



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Andrei Jevtuševski

**ENERGIATÕHUS VENTILATSIOON TOCI OÜ UUE
TOOTMISHOONE NÄITEL**

**ENERGY-EFFICIENT VENTILATION OF NEW PRODUCTION
BUILDING OF TOCI OÜ**

Magistritöö
Tootmistehnika õppekava

Juhendajad: dots. Arne Küüt, *PhD*
lektor Vahur Põder, *PhD*

Tartu 2018

LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Andrei Jevtuševski		Õppekava: Tootmistehnika	
Pealkiri: Energiatõhus ventilatsioon TOCI OÜ uue tootmishoone näitel			
Lehekülgi: 114	Jooniseid: 11	Tabeleid: 16	Lisasid: 8
<p>Osakond / Õppetool: Biomajandustehnoloogiate õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond: 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine</p> <p>CERC S-i kood: T130 Tootmistehnoloogia</p> <p>Juhendaja(d): Vahur Põder, Arne Küüt</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018</p>			
<p>Antud magistritöö eesmärgiks on valida enegriatõhus ja samuti efektiivne ventilatsioonilahendus selleks, et projekteerida TOCI OÜ uuele tootmishoonele energiatõhusa ventilatsiooni. Eesmärgi saavutamiseks on koostatud kirjanduse ülevaade saasteainete kahjulikust mõjust inimtervisele ning kirjeldatud tootmises kasutatavate erinevate ventilatsioonisüsteemide spetsiifikat. Ventilatsioonisedamete arvutustarkvara ACON abil on arvutatud kahe efektiivseima kohtäratõmbeventilatsiooni lahenduse energiakasutust ning on tehtud energiatõhusama lahenduse tasuvusarvutus. Arvutused näitavad, et filterseadmete baassil kohtäratõmbeventilatsiooni lahendus võimaldab säästa energia ning sellel on lühike tasuvusaeg. Magistritöö käigus teostatud ventilatsiooniprojekti saab kasutada reaalse projektina TOCI OÜ uue tootmishoone jaoks.</p>			
Märksõnad: ventilatsioon, energiatõhusus, keevitus, saasteained			

ABSTRACT

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Andrei Jevtuševski		Curriculum: Engineering	
Title: Energy-efficient ventilation of new production building of TOCI OÜ			
Pages: 114	Figures: 11	Tables: 16	Appendixes: 8
Department / Chair: Biosystems engineering Field of research: 4.14. Industrial Engineering and Management (CERC S) code: T130 Production technology Supervisors: Vahur Pöder, Arne Küüt Place and date: Tartu 2018			
The aim of this master's thesis is to select the most energy-efficient as well as effective ventilation solution to design energy-efficient ventilation for a new TOCI OÜ production building. The literature overview of the harmful effects of welding processes pollutants on human health is given. It also describes various specific ventilation systems that are used in production. The energy use of the two most effective ventilation solution has been calculated with ACON software and the cost-benefit analysis of the energy-efficient solution has been made. The calculations show that the solution for the local exhaust ventilation based on the filter equipment allows to save energy and has short payback period. Designed ventilation project can be used as a real project for a new production building for TOCI OÜ.			
Keywords: energy-efficiency, ventilation, welding, pollutants.			

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	2
ABSTRACT	3
TÄHISED	6
SISSEJUHATUS	8
1. TOOTMISHOONE ÕHUKVALITEET	10
1.1. Sisekliima	10
2. KEEVITUSPROTSESSID NING NENDEGA KAASNEVAD SAASTEAINED	12
2.1. Üldist.....	12
2.2. Metallitölm ning selle mõju inimorganismile	13
2.3. Keevitusgaaside ja -aurude mõju inimorganismile ning probleemi võimalikud lahenduskäigud	14
3. RISKIANALÜÜS JA RISKI PROTSESSIDE HALDAMINE	19
3.1. Ohtude kindlakstegemine.....	19
3.1.1. Riskide hindamine	19
3.1.2. Riskide kontroll	20
3.1.3. Kontrollimeetmete läbivaatamine	21
4. TOOTMISRUUMIDE VENTILEERIMINE	22
4.1. Ventilatsiooninõuded keevitustsehhis	22
4.2. Töötsooni ventilatsioon.....	23
4.3. Ventilatsioonilahendused metalliettevõttes	23
4.4. Õhuvahtus keevitustööde läbiviimisel	29
4.5. Kohtäratõmbesüsteemid	30
4.5.1. Õhu retsirkulatsiooni kasutatavad kohtäratõmbe süsteemid.....	31
4.5.2. Õhu retsirkulatsiooni mitte kasutatavad kohtäratõmbe süsteemid	35
4.6. Üldventilatsioonisüsteemid.....	36
5. VENTILATSIOONISÜSTEEMIDE ERILAHENDUSTE ARVUTUS	38
5.1. Üldist.....	38
5.2. S-1/V-1 ventilatsioonivõrgu õhukanalite arvutus	41
5.3. S-1/V-1 ventilatsioonivõrgu rõhukadude arvutus	42
5.4. Soojustagastusega ja ilma õhu retsirkulatsioonita ventilatsioonisüsteem ning selle arvutus.....	44
5.4.1. Ventilatsioonisüsteemi õhuvahtus	44

5.4.2. Energiakulu	46
5.5. Soojustagastusega ja õhu retsirkulatsiooniga ventilatsioonisüsteem ning selle arvutus	50
5.5.1. Ventilatsioonisüsteemi õhuvahetus	50
5.5.2. Energiakulu	53
5.6. Ventilatsioonisüsteemide erilahenduste võrdlusanalüüs	55
5.6.1. Energiakulu võrdlus	55
5.6.2. Hinnavõrdlus	56
5.6.3. Tasuvusarvutus	58
6. VENTILATSIOONISEADME ALUSRAAMI PROJEKTEERIMINE	61
6.1. Sissejuhatus	61
6.2. Ülesande püstitus	62
6.3. Lähteandmed	62
6.4. Projekteerimine	62
6.5. Lahenduskäik (arvutused)	64
6.6. Tulemused ning nende analüüs	65
6.7. Kokkuvõte	67
7. PROJEKTEERITAVA VENTILATSIOONI LÜHIKIRJELDUS	68
8. TULEMUSED JA ARUTELU	70
9. KOKKUVÕTE	72
10. SUMMARY	73
KASUTATUD KIRJANDUS	74
LISAD	79
Lisa 1. Energiaarvutus S-1/V-1	80
Lisa 2. Energiaarvutus 1171 l/s sissepuhke õhku	89
Lisa 3. Põhikorruse ventilatsiooniplaan: sissepuhe	96
Lisa 4. Põhikorruse ventilatsiooniplaan: väljatõmme	97
Lisa 5. Põhikorruse ventilatsiooniplaan: LÕIGE A-A	98
Lisa 6. Alusraami joonised	99
Lisa 7. Ventilatsiooni projekt. Ehituskirjeldus	105
Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	114

TÄHISED

a – aastane energiasääst, EUR/aastas

B_o – investeering, EUR

F – õhukanali ristlõikepind, m²

H_1 – ventilatsioonisüsteemi summaarne aastane energiamaksumus, EUR/aastas

H_2 – soojustagastusega ja õhu retsirkulatsiooniga ventilatsioonilahenduse summaarne aastane energiamaksumus, EUR/aastas

H_{el} – tarbitud elektrienergiakulu aastane maksumus, EUR/aastas

h_{el} – elektrienergia hind lõpptarbijale, EUR/kW·h

H_{soojus} – tarbitud soojusenergia aastane maksumus, EUR/aastas

h_{soojus} – soojusenergia hind, EUR/kW·h;

$k_{k.k}$ – käsikeevituse filterseadmete kasutustegur

$k_{k.r}$ – keevitusroboti filterseadme kasutustegur

P_f – filterseadmete summaarne võrgust tarbitav võimsus, kW

$P_{f.k}$ – käsikeevituse filterseadme võrgust tarbitav võimsus, kW

$P_{f.r}$ – keevitusroboti filterseadme võrgust tarbitav võimsus, kW

P_k – kohtäratõmbe mootorite summaarne võrgust tarbitav võimsus, kW

$P_{k.k}$ – käsikeevituse kohtäratõmbe ventilaatori mootori võrgust tarbitav võimsus, kW

$P_{k.r}$ – keevitusroboti kohtäratõmbe ventilaatori võrgust tarbitav võimsus, kW

Δp_k – rõhukadu kohtakistuses, Pa

$\Delta p_{sissepuhe}$ – summaarne rõhukadu sissepuhkesüsteemi kohtakistustes, Pa

$\Delta p_{väljatõmme}$ – summaarne rõhukadu väljatõmbesüsteemi kohtakistustes, Pa

Q_{soojus} – ventilatsioonisüsteemi summaarne tarbitav soojusenergia hulk, kW·h

$Q_{soojus1}$ – ventilatsiooniseadme S–1/V–1 tarbitav soojusenergia aastas, kW·h

$Q_{soojus2}$ – kompensatsiooniõhu soojendamiseks vajalik soojusenergia aastas, kW·h

s – siirdeõhk, l/s

T – diskonteerimata tasuvusaeg, aastat

t_{aasta} – ventilaatorite mootorite tööaeg aastas, h
 t_p – töötundide arv päevas, h
 $T_{\ddot{u}}$ – tasuvusaja ülempiir, aastat
 u_a – tööpäevade arv aastas, p
 $u_{f.k}$ – käsikeevituse filterseadmete arv, tk
 $u_{f.r}$ – keevitusroboti filterseadmete arv, tk
 $u_{k.k}$ – käsikeevituse äratõmbeventilaatorite arv, tk
 $u_{k.r}$ – keevitusroboti kohtäratõmmete arv, tk
 V – õhuvool kanalis, m³/h
 v – õhuliikumiskiirus õhukanalis, m/s
 W_{el} – ventilatsioonisüsteemi summaarne tarbitav elektrienergia aastas, kW·h
 W_f – filterseadmete aastane tarbitav elektrienergia, kW·h
 W_k – kohtäratõmbe poolt tarbitav elektrienergia aastas, kW·h
 W_{s1v1} – ventilatsiooniseadme S–1/V–1 tarbitav elektrienergia aastas, kW·h
 ζ – kohttakistustegur
 ρ – õhu tihedus, kg/ m³

SISSEJUHATUS

Hea sisekliima mängib meie igapäevaelus suurt rolli, mõjutades positiivselt või negatiivselt meie enesetunnet, tervist ja tööviljakust.

Antud magistritöös selgitan välja keevitusprotsesside ajal tekkivate saasteainete mõju tööliste (eelkõige keevitajate) tervisele ja meetmeid mille abil neid vähendada või kõrvaldada. Seejärel projekteerin ventilatsioonisüsteemid tootmishoonele, milleks on TOCI OÜ uus metallitöötlemise tsehh, milles toimub keevitamine ja teostan kahe efektiivseima ventilatsioonilahenduse energiaarvutuse, et võrrelda omavahel nende energiakulu erinevusi. Saadud tulemuste alusel valin välja energiasäästlikuma lahenduse ja selle baasil koostan ventilatsiooni projekti ning projekteerin ventilatsioonisüsteemid, mis on lõputöö peamine eesmärk.

Töö eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised ülesanded:

- Anda ülevaade tootmishoonete õhukvaliteedist;
- Keevitusprotsesside kirjelduse ülevaade;
- Anda ülevaade saasteainetest ning nende mõjust inimorganismile;
- Anda ülevaade tootmisruumide ventileerimisvõimalustest;
- Läbi viia ventilatsioonisüsteemide erilahenduste arvutuse;
- Projekteerida alusraam ventilatsiooniseadmele;
- Projekteerida ventilatsioonisüsteemid ning koostada ventilatsiooni projekt.

TOCI OÜ tootmishoonete soojusenergia tootmiseks kasutatakse maagaasi. Selleks on olemasoleva peamaja katlaruumis asuv gaasikatel võimsusega 94 kW, mis on mõeldud kütte- ja ventilatsioonisüsteemide soojavee tootmiseks, tsehhi õhu soojendamiseks on ette nähtud gaasikalorifeerid.

Uue tootmishoone ventilatsiooni soojusenergia vajaduse arvutamiseks on kasutatud ventilatsiooniseadmete arvutustarkvara ACON. Antud programmis kasutatud lähteandmed ning selle abil saadud tulemused, mis on kasutatud selles töös, on välja toodud lisas 1 ja 2. Ventilatsiooni projektid on koostatud vastavalt kehtivatele sisekliima normidele. Tootmishoone üldventilatsiooni tagamiseks on kasutatud veekalorifeeriga varustatud ventilatsiooniagregaati S-1/V-1 millel on plaatsoojustagasti. Iga keevituse saasteallika

juurde on projekteeritud oma kohtäratõmbesüsteem V-2...V-6 mobiilsete filterseadmete baasil.

Antud töö probleemiks on efektiivse ventilatsiooni projekteerimine, mis tagaks tervisliku sisekliima, võimaldaks eemaldada keevitusprotsessi käigus tekkinud saasteained ning oleks energiasäästlik. Standardse, kuid soodsamate investeerimiskuludega ventilatsioonilahenduse probleemiks on kõrgendatud soojusenergia vajadus, mis toob lisakulud selle kasutamise protsessi käigus. Selle probleemi lahendamiseks viiakse läbi kahe ventilatsioonilahenduse energiaarvutused, tänu millele on leitakse mõlema lahenduse arvutuslik energiakulu. Samuti saadakse teada kui palju saab vähendada energiakulusid võttes kasutusse meetmeid, mis võimaldavad taaskasutada soojusenergia.

1. TOOTMISHOONE ÕHUKVALITEET

1.1. Sisekliima

Inimene veedab suurema osa oma päevast siseruumides seega mõjutab sisekliima kvaliteet tugevasti tema tervist ning töövõimet. Ebapiisav ventilatsioon, sise- ning välisõhust pärit keemilised ning bioloogilised saasteallikad - kõik need võivad põhjustada tugevaid tervisehäireid (mõjutades nahka, limaskesta, hingamisteid), viia tööviljakuse langemisele ning tekitada ebamugavust. Juba aastal 1989 olid USA Keskkonnakaitseagentuuri (EPA) poolt läbi viidud uuringud näidanud, et siseruumide saasteainete sisaldus võib olla kordades kõrgem kui väliskeskkonnas ning parendades siseõhu kvaliteeti, tõstab see nii tootlikkust kui ka viib minimaalsele tasemele töötajate haiguspäevi [1].

Eestis kehtib praegu sisekliima standard EVS-EN 15251:2007 „Sisekeskkonna alandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast“, mis täpsustab hoonete energiatõhusust mõjutavaid sisekliima parameetreid [2]. Lisanõuded sisekliima kohta on käsitletud standardis EVS 906:2018 „Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017“ ja standardis EVS-EN 16798-3:2017 „Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 3: Mitteeluruumide ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimise süsteemidele“. Samas aga peab rõhutama, et siseruumide õhukvaliteet ei ole lihtsasti määratletud mõiste vaid on pigem pidevalt muutuv interaktsioon keerukatest faktoritest, mis kõik mõjutavad siseruumide saasteainete tüüpi, taset ning tähtsust. Selliste faktorite juurde kuuluvad: saasteainete või lõhnade allikad, hoonete ventilatsioonisüsteemide projekteerimine, hooldus ja käitlemine, niiskus ja töötajate vastuvõtlikkus. Madala kontsentratsiooniga saasteaineid on raske tuvastada ja selle asemel, et mõõta saasteainete hulka siseruumis tasub seda hoopis säilitada puhtana, hästi ventileerituna, optimaalse niiskuse ja temperatuuri juures. Kuid see ei ole alati võimalik.

Üheks võtmefaktoriks hea õhukvaliteedi tagamisel siseruumis on selle varustamine piisavas koguses värske õhuga ja samuti on oluline õhu efektiivne jaotamine. See on hoonetele

elutähtis kuna siseruumi õhukvaliteedi halvendavad erinevad hoonesisesed faktorid nagu [3]:

- Ehitusmaterjalid ja sisustus;
- Tehnoloogilised protsessid;
- Hooned muutuvad järjest õhutihedamaks;
- Allergeenide allikad;
- Kontoriseadmed;
- Inimesed.

Samuti peab siin haldama saasteainete allikat püüdes seda kontrolli all hoida või isoleerides inimesi, kasutades selleks füüsilisi barjääre, õhurõhkude suhet või kontrollides ajastust.

Teiseks tuleks „lahjendada“ saasteaineid ning kuna viimaste kontsentratsioon siseruumis sõltub sellistest faktoritest nagu [4]:

- Välisõhuga sisse kantavatest gaasidest ja osakekest;
- Gaaside ja osakeste eritumisest inimesest ja inimeste tegevusest;
- Gaaside eritumisest hoone ehitusmaterjalidest ja sisustusest;
- Ventilatsioonisüsteemist;

tuleb neid eemaldada läbi ventilatsiooni ning võimaluse korral kasutades ka filtreerimist.

2. KEEVITUSPROTSESSID NING NENDEGA KAASNEVAD SAASTEAINED

2.1. Üldist

Masinaehitusdetailide ja metallikonstruktsioonide valmistamisel siseruumides on enimlevinud järgmised keevitusprotsessid:

- TIG-keevitusprotsess, mis kannab Ameerika Ühendriikides nimetust *Gas tungsten arc welding (GTAW)* on sulamata volframelektroodiga kaarkeevituse protsess kaitsegaasi keskkonnas. Antud keevitusprotsessi kasutatakse enamjaolt õhemate metallide keevitamiseks ja seal kus keevisõmbluse visuaalne pool, koos selle kvaliteediga, mängib väga suurt rolli. Selle keevitusprotsessi eelisteks on erinevate metallide ühendamine, räbu puudumine, lühem kuumuse poolt mõjutatud tsoon jne. võrreldes MIG/MAG keevitusprotsessiga [5];
- MIG/MAG-keevitusprotsess mis kannab Ameerika Ühendriikides nimetust *Gas metal arc welding (GMAW)* on kaarkeevituse protsess sulava elektroodiga kaitsegaasi keskkonnas. MIG-keevitusprotsessis kaitsegaasina kasutatakse väärisgaase ehk inertgaase (nt heelium (He), argoon (Ar)) ja nende segusid. Seda protsessi kasutatakse põhiliselt alumiiniumi või roostevaba terase keevitamiseks. MAG-keevitusprotsessis kasutatakse aktiivgaasi nagu süsihappegaas ehk süsinikdioksiidi (CO_2), mis oli varasematel aegadel väga levinud kaitsegaas või siis viimasel ajal populaarseks muutunud gaasi segusid nn segugaase (Ar + 18-20% CO_2). MIG/MAG keevitusprotsesse saab kasutada kõikide keevitatavate metalsete materjalide keevitamiseks: legeer-, madallegeer- ja kõrglegeerteraste puhul, samuti alumiiniumi-, vase- ja niklisulamite puhul. [6]

Keevitus ning sarnased protsessid tekitavad suitsu ja gaase, mis sisse hingamisel võivad olla inimestele ohtlikud. Faktorid, mis mõjuvad suuremal või väiksemal määral suitsu ja gaaside teket keevitamise ajal on järgmised [7]:

- Keevituselektroodi või traadi läbimõõt (mida suurem diameeter seda suurem on suitsu ja gaasi kogus);

- Keevituskiirus (väga madalal kiirusel gaasi ja suitsu kogus kasvab kui selline kiirus on väljaspool optimaalset keevituskiirust, seega kasutatakse üldiselt optimaalset kiirust, mille ajal suitsu ja gaasi kogus on suhteliselt stabiilne);
- Vooluallikas (keevitusseadmel käsikaarkeevitusel kaitsegaasi keskkonnas on suur mõju keevitussuitsu ja gaasi tekkele);
- Keevituskonfiguratsioon (keevisõmbluse tüüp ja keevituspüstoli kaldenurk mängivad samuti rolli gaaside ja aurude tekkel);
- Kaitsegaasi tüüp (mingil määral mõjutab gaaside ja aurude teket; rohkem gaase ja auru tekib kõrge oksüdeerimisvõimega kaitsegaasidel nagu näiteks puhtal süsinikdioksiidil (CO₂));
- Keevitatav materjal ning selle puhtus (näiteks galvaniseeritud terase keevitamise ajal tekib rohkem suitsu, õlise pinnaga materjalil samuti).

Aurude ja gaaside koostise ja heitetaseme tundmine võib osutada väga kasulikuks töötervishoiuspetsialistidele töötajate kahjuliku mõjutuse (*exposure*) hindamisel ja asjakohaste kontrollimeetmete määramisel. Absoluutne mõjutus sõltub sellistest faktoritest nagu keevitaja positsioon keevitussuitsu ja tõmbetuule suhtes ja ei saa olla prognoositav heitetaseme andmete järgi. Siiski ühes ja samas tööolukorras kõrgem heitetase eeldatavasti korreleerub kõrgema mõjutusega ja madalam heitetase madalama mõjutusega. [8]

Kokkuvõtteks võib öelda, et heitetasemete andmeid saab kasutada selleks, et prognoosida mõjutuse suhtelisi muutusi, mis võivad tekkida töökohal erinevates keevitustingimustes ja määrata kindlaks meetmeid selle vähendamiseks, kuid neid andmeid ei tohi kasutada ventilatsiooninõuete arvutamiseks.

2.2. Metallitolm ning selle mõju inimorganismile

Metalli lihvimise või lõikamise käigus tekib suures koguses metallitolmu mis koosneb väiksetest tahketest osakestest mis on hajutatud õhus. Paljud faktorid mõjutavad tolmu ohtlikkust - nii sõltub see osakeste suurusest, tüübist ning ainetest, mis võivad koos tolmu osakestega kaasneda (nt õli, suits). Enamik sisse hingatavatest osakestest püütakse kinni nina limaskestast ning liikuvate ripsmekeste abil ning need ei satu kopsudesse. Väiksemate tolmuosakeste sattumine hingamisteedesse võib põhjustada/süvendada astmat,

kopsupõletikku ning bronhiiti. Erinevad uuringud on näidanud korrelatsiooni suurenenud tolmuosakeste osakaaluga õhus ning suurenenud vähi ning hingamisteede, südame ja veresoonkonna haiguste sageduse suurenemise vahel [47] - seega tolm, mis sisaldab raskemetalli osakesi ning mürkaineid, on tervisele väga ohtlik .

2.3. Keevitusgaaside ja -aurude mõju inimorganismile ning probleemi võimalikud lahenduskäigud

Keevitusgaase kasutatakse või tekitatakse keevitus- ja lõikamisprotsesside käigus, nagu näiteks varjestusgaasid ehk kaitsegaasid või gaasid, mis tekivad räbu lagunemise, ultraviolettkiirguse või kõrgtemperatuuri vastasmõjul õhus olevate gaasidega või aurudega. Keevitus- ja lõikamisprotsessides kasutatavad gaasid: kaitsegaasid nagu süsinikdioksiid, argoon, heelium jne; gaaskütused nagu atsetüleen, propaan, butaan jne ja hapnik, mida kasutatakse koos gaaskütustega. Keevitus- ja lõikamisprotsessidest toodetud gaasid hõlmavad järgmist: süsinikdioksiid, mis tekib räbu lagunemisest; kaare keevitamisel tekkiv süsinikmonooksiid (süsinikdioksiidi kaitsegaasi lagunemisel); elektrikaare ning atmosfäärhapniku tekitatud osoon; lämmastikoksiid atmosfäärhapniku ning lämmastiku kuumutades; vesinikkloriid ja fosgeen, mis saadakse ultravioletvalguse ning klooritud süsivesinikku rasvaemaldavate lahustite aurude vahendusel (nt trikloroetüleen, TCE). Samas võivad mõningad gaasid tekkida ka katete termilisest lagunemisest: polüuretaankatted võivad tekitada vesiniktsüaniidi, formaldehüüdi, süsinikdioksiidi, süsinikmonooksiidi, lämmastikoksiide ja isotsüanaadi auru; epoksiidkatted võivad tekitada süsinikdioksiidi ja süsinikmonooksiidi; vinüülvärvid võivad tekitada vesinikkloriidi; fosfaatsed rooste inhibeerivad värvid (*phosphate rust-inhibiting paints*) võivad vabastada keevitusprotsesside ajal fosfiini. [9]

Tabelis 2 on näidatud peamised keevitussuitsu tüübid, nende allikad ning nende mõju inimorganismile.

Tabel 2. Keevitusgaaside tüübid, allikad ning nende mõju inimorganismile

Keevitussuitsu tüüp	Allikas	Mõju tervisele
Alumiinium (Al)	Alumiiniumi komponent sulamite koosseisus (nikkel-kroom, vask, tsink, teras, magneesium, messing, täitematerjalid).	Hingamisteede ärritus.
Berüllium (Be)	Tugevdaja mida leitakse vase-, magneesiumi-, alumiiniumi sulamites ning elektrilistes kontaktides.	Kantserogeen, krooniliste haiguste tekitaja k.a hingamisteede kahjustaja.
Kaadmiumi oksiidid (CdO)	Sisaldav kaadmiumi roostevaba teras, anodeeritud materjalid, tsingisulamid.	Hingamisteede ärritus, valulik/kuiv kurk, valu rinnus ning hingamisraskused. Krooniline mõju neerukahjustus, emfüseem. Arvatavasti kantserogeen.
Kroom (Cr)	Roostevabad terased ja kõrglegeermaterjalid, keevitusvardad. Kasutatakse katematerjalina.	Suureneb kopsuvähi riski võimalus; nahaärritused. Mõned on kantserogeenid (kuuevalentne kroom).
Vask (Cu)	Sulamid nagu: nikkel-vask, messing, pronks. Mõned keevitustraadid.	Tugev mõju silmadele, nina- ning kurgu ärritus, iiveldus ning „metallipalavik“.
Fluoriidid (F ⁻)	Enamus elektroodide katteid; räbu materjali koosseisus nii madal- kui ka kõrglegeerterastel.	Silma, nina, kõri ärritus. Pikaajaline toime võib põhjustada luu ja liigeste probleeme. Krooniline efekt – liigne vedelik kopsudes.
Raudoksiidid (Fe _x O _x)	Peamine saasteaine terase- ja raua keevitamisprotsessides.	Sideroos - healoomuline kopsuhaigus, mis on tingitud ladestunud osakestest kopsudes. Äge nina- ja kopsu ärritus. Peatub/kaob kui kokkupuude lakkab.
Plii (Pb)	Jootemetall, messing, pronkssulamid, teraste katted.	Krooniline mõju närvisüsteemile, neerudele, seedetraktile ja vaimsele tervisele. Võib põhjustada mürgitust. Ototoksiline ning seetõttu võib tekitada kuulmiskahjustusi.
Mangaan (Mn)	Enamik keevitusprotsessid, eriti kõrgetõmbetugeva teraste puhul.	„Metallipalavik“, kroonilised mõjud tekitavad probleeme kesknärvisüsteemiga. Ototoksiline ning seetõttu võib tekitada kuulmiskahjustusi.
Molübdeen (Mb)	Terase sulamid, raud, roostevaba teras, nikli sulamid.	Silma, nina, kurgu ärritus. Võib tekitada õhupuudulikkust.
Nikkel (Ni)	Roostevabad terased; nikkel-vask ja muud kõrglegeermaterjalid; keevitustraadid; anodeeritud teras.	Silma, nina, kurgu ärritus. Seotud dermatiidi ning kopsuhaigustega.
Vanaadium (V)	Teraste sulamid, roostevaba teras, nikli sulamid.	Äge mõju silmadele, nahale, hingamisteedele. Krooniline mõju: bronhiit, retiniit (võrkkesta põletik), kopsupõletik ning vedeliku kogunemine kopsudes.
Tsinkoksiidid (ZnO)	Galvaniseeritud- ja värvitud metall.	„Metallipalavik“

Samuti tekivad keevitusprotsessides keevitusaurud. Viimased on segud metallioksiididest, silikaatidest ning fluoriididest. Aurud tekkivad siis, kui metall on kuumutatud üle keemistemperatuuri ning selle aurud kondenseeruvad väga peenikeste tahkete osakestena - seega sisaldavad keevitusaurud tavaliselt nii elektroodi kui ka keevitatava materjali osakesi.[10]

Tabel 3. Kevitusaurude allikad ning nende mõju inimorganismile

Keevitusauru tüüp	Allikas	Mõju tervisele
Süsinikmonooksiid (vingugaas) (CO)	Moodustub keevituskaares	Imendub kergesti vereringesse, põhjustades peavalu, peapööritusi, lihasnõrkust. Suured kontsentratsioonid võivad põhjustada teadvuse kaotust ning surma. Ototoksiline ning seetõttu võib tekitada kuulmiskahjustusi.
Vesinik-fluoriidid (HF)	Elektroodkatete lagunemise käigus	Ärritab silmi ja hingamisteid. Üleannustamine võib põhjustada kopsu-, neeru-, luu- ja maksakahjustusi. Krooniline efekt: nina, kõri ja bronhide ärritus.
Lämmastikoksiidid (NO _x)	Moodustub keevituskaares	Silmade, nina ja kurgu ärritus madalate kontsentratsioonide juures. Ebanormaalne vedelik kopsudes ja muud tõsised tagajärjed suuremate kontsentratsioonide juuresolekul. Kroonilised mõjud hõlmavad kopsuprobleeme nagu emfüseem.
Hapniku puudus	Keevitamine piiratud ruumides ning õhu asendamine kaitsegaasidega.	Pearinglus, lämbumine, surm.
Osoon (O ₃)	Tekib keevituskaares avatud keevituskaare protsessis. Sealhulgas MMAW (<i>Manual Metal Arc Welding</i>), FCAW (<i>Flux Cored Arc Welding</i>), MIG/TIG (<i>Metal/Tungsten Inert Gas</i>) keevitusprotsessides.	Ägedad mõjud hõlmavad vedelikku akumulierimist kopsudes. Väga madalad kontsentratsioonid (nt üks osa miljonist) põhjustavad peavalu ja silmade kuivust. Kroonilised mõjud hõlmavad märkimisväärsed muutusi kopsufunktsioonis.
Fosfiin (PH ₃)	Rooste inhibiitoritega kaetud metall. Moodustub rooste inhibiitori reaktsioonis keevituskiirgusega.	Ärritab silmi ja hingamiselundeid; võib kahjustada neerusid ja muid organeid.

Tabelis 3 ja 4 on toodud põhiliste keevitusaurude tüübid, mis tekivad keevitamisprotsesside käigus.

Tabel 4. Keevitamise tulemusena tekkivate orgaaniliste aurude allikad ning nende mõju inimorganismile

Keevitusauru tüüp	Allikas	Mõju tervisele
Aldehüüdid (–CHO) (formaldehüüd)	Metallkatted koos sideainete ning pigmentidega. Rasvalahustid.	Ärritab silmi ja hingamisteid.
Diisotsüanaadid	Polüuretaanvärviga metallid.	Ärritab: silmi, nina, kurku. Astmaatiliste sümptomite väljakujunemine.
Fosgeen (COCl ₂)	Metallid rasvalahustite jääkidega. Moodustub lahusti ning keevituskiirguse protsessi käigus.	Ärritab silmi, nina ja hingamisteid.

Kuna nii aurud kui ka gaasid, mis tekkivad keevitusprotsesside käigus, ohustavad erineval määral inimorganismi, nõuab Euroopa Tööstuse ja Tervishoiu Agentuur (*OSHA*) kas mehaanilise kohtväljatõmbeventilatsiooni (edasi *LEV* – ingl *Local Exhaust Ventilation*) või üldventilatsioonisüsteemide kasutamist, et oleks tagatud aurude, gaaside, tolmu, ning tahkete osakeste mõjutuste tase alla lubatud piirnormide. Loomulikku ventilatsiooni peetakse keevitamiseks või lõikamiseks piisavaks ainult juhul kui ruumi tingimused vastavad nõuetele, mis on käsitletud „OSHA 29 CFR 1910.251-.255“ regulatsioonides [11]:

1. Keevitusala ruumala on vähemalt 284 m³ iga keevitaja kohta;
2. Ruumi lae kõrgus ei ole vähem kui 5 m;
3. Ristventilatsioon (*cross ventilation*) ei tohi olla takistatud vaheseinte, seadmete, või muude konstruktsioonelementide poolt. Märkus: kui keevitustöö peab olema läbiviidud igalt poolt kaitseekraanidega piiritletud alal, tuleb kaitseekraanid paigutada nii, et need ei takista ventilatsiooni. Kaitseekraanid peavad olema monteeritud nii, et nende ja põranda vahel oleks vahe ca. 0,6 m (välja arvatud juhtudel, kui keevitustöö teostatakse madalal tasemel ja ekraanid peavad ulatuma põrandani selleks, et mitte pimendada kõrvaltöötavaid töölisi);
4. Keevitusprotsess ei toimu kinnises ruumis.

Ruumid mis ei vasta nendele tingimustele peavad olema varustatud mehaanilise ventilatsiooniga, mis eemaldab vähemalt 944 liitrit õhku sekundis (l/s) iga keevitaja kohta, välja arvatud juhtudel, kui kasutatakse kohtväljatõmbeventilatsiooni või õhu etteandmisega respiraatoreid (*air-line respirators*) [11].

Kohtväljatõmbeventilatsioon on vajalik ja kasutatakse siis, kui töötajad on mõjutatud kõrgelt toksiliste kemikaalidega, mis tekitavad suures koguses keevitussuitsu või kui kaasnevad suured kulud soojusele ja ventilatsioonile talvel. *LEV* tekitab kui ventilaator liigutab õhku

kõrgrõhutoonist madalarõhutooni. Kohtväljatõmbeventilatsioon tuleb paigaldada saasteallikale maksimaalselt lähedale, et püüda saasteained kinni enne kui need segunevad ruumi õhuga.

Ohutuste säilitamiseks piiratakse tööprotsessi: nii toimub keevitusprotsesside automatiseerimine näiteks robotseadmete abil (poolautomaatne või täielikult automaatne), kus kogu protsess toimub piiratud ruumis (tsoonis) ning töötaja kokkupuude keevituse saasteainetega on minimaalne.

Alati peab olema teadlik ning kasutama kõikide keevitustööde teostamisel vastavaid isikukaitsevahendeid ja kaitseriietust:

- Kaitsemaske silmade- ja näo kaitsmiseks nii ultraviolet- ja infrapunakiirguse kui ka sulametalli osakeste (pritsmete) ning põletuste ja silmakahjustuste eest;
- Kaitseriided peavad varieeruma sõltuvalt keevitamiskohast ja töö iseloomust. Kevitajad kes töötavad kaarkeevitusega, peavad alati kandma tulekindlaid nahkkindaid ja muid kaitseriideid (nt nahast põlled, kaitsepaad jne).

3. RISKIANALÜÜS JA RISKI PROTSESSIDE HALDAMINE

3.1. Ohtude kindlakstegemine

Keevitusprotsessidega seotud riskide haldamises on peamine samm kõikide kahjulikke ohtude kindlakstegemises. Näiteks toodavad keevitus ning sellega kaasnevad või seotud protsessid ultraviolet- ja infrapunakiirgust, mis võivad põhjustada põletusi, vähki ning kahjustada silmi. Neid potentsiaalseid ohtusid võib tuvastada mitmel erineval viisil [12]:

- Enda töökoha hindamise läbiviimisel, jälgides tööd ning rääkides töötajatega kuidas nende töö toimub;
- Kontrollides keevitusprotsessis kasutatavaid materjale ning seadmeid;
- Toodete siltide, ohutuskaartide ning juhendite lugemisel;
- Rääkides ja vajaduse korral ka küsides nõustamist tootjatelt, tarnijatelt, tööstusliitude- ning tervishoiu- ja ohutusspetsialistidelt;
- Vahejuhtumite aruannete läbivaatamisel.

3.1.1. Riskide hindamine

Riskihindamine hõlmab kaalumist, mis võib juhtuda juhul kui keegi sattub ohtu koos selle esinemise tõenäosusega. *WHS* määruse kohaselt ei ole keevitamisel riskihindamine kohustuslik, samas on see nõutav konkreetsetes olukordades, näiteks kui tegu on piiratud ruumis töötamisega. [16]

Mõndadel juhtudel aitab riskihindamine kaasa [16]:

- Tuvastada, millised töötajad on ohutsoonis;
- Määrata mis allikad ning protsessid saavad seda riski põhjustada;
- Tuvastada kas ja milliseid kontrollimeetmeid tuleks rakendada;
- Kontrollida olemasolevate kontrollimeetmete tõhusust.

Alati peab ka silmas pidama, et riskid sõltuvad paljudest teguritest - keevitusmaterjali omadustest, keevitatud esemete pinnakattest (juhul kui need sisaldavad pliidi või teisi mürgiseid materjale), keevitusseadmete seisundist, töötingimustest kus keevitamine toimub ning keevitaja oskustest, pädevusest ja kogemusest [12]. Samas pole need ainukesed tegurid, ka erinevad keevitusprotsessid võivad mõjutada seda riski. Näiteks elektrilöögi oht on väiksem kasutades kaarkeevitust kaitsegaasi keskkonnas (GMAW protsess - *gas metal arc welding*) võrreldes elektroodkeevitusega ehk käsikaarkeevitusega (MMA protsess - *manual metallic arc*), sest avatud vooluahela pinged on madalamad, kasutatakse ainult alalisvoolu ning vool lülitakse käsitsi sisse ja välja.

3.1.2. Riskide kontroll

Kontrollimeetmete tõhusus on erinev. Kõigepealt peab alati püüdma elimineerida potentsiaalset ohtu ning sellega kaasnevaid riske. Samas pole viimane tegevus alati võimalik ning sellel juhul peab rakendama järgmisi lähenemisviise:

- Asendus: asendada ohtlik materjal/protsess vähemohtlikuga;
- Isolatsioon: keevitaja ning lähiümbruses olevate töötajate kõrvaldamine/isoleerimine ohutsoonist;
- Tehniline kontroll: riski minimiseerimiseks tuleks kasutada tehnilisi kontrollmeetmeid (nagu ventilatsioonisüsteemid keevitusgaaside ja aurude eemaldamiseks).

Juhul kui riski võimalus jääb, tuleks seda minimiseerida rakendades vastavaid halduskontrollide meetmeid, mis oleksid mõistlikult teostatavad. Näiteks kui keevitusprotsess toimub väga kuumas keskkonnas, mis võimaldab keevitajal keevitada ainult piiratud aja jooksul, peab sellele järgnema puhkepaus ning vajalik jahtumisaeg mis omakorda vähendab soojust ammendumise ohtu. Ka järelejäänud riskid tuleks minimiseerida näiteks sobivate isikukaitsevahendite kasutamisega (kummisaapad, kui keevitaja seisab metallilistel pindadel). Samas on oluline märkida, et nii halduskontrollmeetmed kui ka rakendatavad isikukaitsevahendid sõltuvad inimkäitumisest

ning vajavad järelevalvet - kasutades neid töötajate enda meeleolu järgi on need riskide minimiseerimiseks vähem efektiivsed ning võivad tekitada hoopis uusi ohutegureid. [13]

3.1.3. Kontrollimeetmete läbivaatamine

Selleks, et tervise ja ohutuse kaitseks kehtestatud kontrollimeetmed oleksid tõhusad, peaksid need olema korrapärased ning pidevalt jälgitavad. Kui aga kontrollimeetmed ei tööta tõhusalt tuleks need läbi vaadata - ülevaatomismeetodid hõlmavad töökoha kontrolli, nõustamist, testimist, analüüsi ning andmete arvestust.

4. TOOTMISRUUMIDE VENTILEERIMINE

4.1. Ventilatsiooninõuded keevitustsehhis

Ventilatsioon on õhuvahetuse protsess, kus toimub siseruumi õhu asendamine värske välisõhuga. Ventilatsiooni abil võib vajadusel eemaldada ruumist liigsoojust, kui näiteks sissepuhkeõhk on jahedam kui ruumiõhk, või vastupidi varustada ruumi soojusega, kui sissepuhkeõhk on soojem kui ruumiõhk.

Selliste protsesside puhul nagu keevitamine, kõvajoodisega jootmine, jootmine või põleti lõikamine on ventilatsiooni esmane eesmärk eemaldada töötaja hingamistsoonist õhu saasteained ning selleks on kõige efektiivsem viis kohalik väljatõmbeventilatsioon [14].

Kokkuvõtvalt kasutatakse ventilatsiooni reeglina kolmel üldisel eesmärgil:

- Eemaldada töötaja hingamistsoonist ning tööpiirkonnast õhu saasteained;
- Vältida tuleohtlike või põlevate gaaside/aurude kuhjumist;
- Vältida hapnikurikast või -puudulikku atmosfääri.

Erinevatel juhtudel võib vaja minna erinevaid ventilatsioonistrateegiaid, peamiselt selleks, et eemaldada töötaja (keevitaja) hingamistsoonist õhu saasteained minimiseerides kokkupuudet kahjulikke aurudega ning teiste saasteainetega töötsoonis. Nii ei tohi keevitussuitsu kontsentratsioon keevitaja töötsoonis ületada 5 mg/m^3 [15].

Ventilatsioonisüsteemi valikul peab seega alati arvesse võtma järgmist: toodetud auru ja saasteainete kogust ja tüüpi; keevitusprotsessi lähedust ja asukohta ventilatsioonisüsteemi suhtes; ventilatsiooni lahendust, kas loomulik või mehaaniline, nii kogu töökoha kui ka keevitamise jaoks; keevitusala - see sõltub ka ekraanidest ja vaheseintest, mis võivad piirata voolu läbilaskevõimet tööalale või töötsooni; keevitaja hingamistsooni lähedust suitsuallikatele [16]. Üldised juhised on avaldatud CSA standardis W117.2 Keevitamise, lõikamise ja sellega seotud protsesside ohutus ning ANSI (Ameerika Riiklik Standardiinstituut) standardis Z49.1 Keevitus- ja lõikamisohutus [17, 18]. Kui ventilatsiooni kasutatakse töökaitsevahendina, tuleb ventilatsioonisüsteemi kasutada ja hooldada vastavalt

vastuvõetavatele nõuetele ning protseduuridele [10]. See on ennekõike vajalik selleks, et halb/mitte kvaliteetne ventilatsioon võib tugevasti mõjutada tervist, tekitades kopsuvähki (keevitusaurud), kroonilist bronhiiti, metalli aurudest tulenevat palavikku, ärritustunnet ninas/kurgus/bronhides, allergiat ning palju teisi hingamisteede vaevusi [10].

4.2. Töötsooni ventilatsioon

Ventilatsioon peab eelkõike tagama saasteainete eemaldamise töötaja töötsoonist ning tagama värske õhu juurdevoolu. Väikestes ja kinnistes ruumides mittepiisav eemaldatava õhu kogus võib tekitada keevitussuitsu kontsentratsiooni kiiret kasvu. Uuringud näitavad, et kui imutoru õhuvõtuots (*hood opening*) on paigaldatud keevitaja hingamistsooni näoga ühele kõrgusele, võimaldab see efektiivsemalt hoida keevitussuitsu kontsentratsiooni madalamal tasemel ja ennetada saasteainete sattumist hingamistsooni. See võib olla teostatav ka tavalisest väiksema õhuhulgaga, lisaks võimaldab see suurendada distantssi õhuvõtuotsa ja keevituskaare vahel, mis vähendab ka keevisõubluse läbivate pooride teket. Uuringud näitavad, et keevitussuitsu kogus suureneb koos keevitusvoolu suurendamisega. Siiski genereeritud suitsu kogus ei sõltu ainuüksi keevitusvoolust vaid ka keevitustraati lisatud elementidest ja ka keevitatavast materjalist. [19]

Kui jälgida õhu liikumiskiirust, siis Jaapani Keevitusühing (*JWES*) soovib, et õhu liikumiskiirus oleks keevituskaare lähedal imemispunktis vahemikus 0,3-0,5 m/s [20]. Ameerika Konverents Valitsuse Tööstuslike Hügieenikuid (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists, lüh. ACGIH*) teavitab, et õhu liikumiskiirus üle 0,5-1,0 m/s võib häirida keevituse kaitsegaasi [21].

4.3. Ventilatsioonilahendused metalliette võttes

Nagu eelnevalt juba märgitud sai on ventilatsiooni esmatähtsaks ülesandeks saasteainete eemaldamine ruumist, et hoida õhu kvaliteeti või puhtust soovitud tasemel ja juhul kui see on ainus ülesanne, määravadki õhuhulga suurust saasteainete eemaldamine ruumist ja õhu

kvaliteedi nõuded. Need määravad ka võimaliku ventilatsioonilahenduse valiku. Vajadusel saab ka ruumi õhuniiskust mõjutada ventilatsiooni abil [4].

Laborites, tööstushoonetes ja muudes sarnastes hoonetes kaitsevad lokaalsed õhu väljatõmbeseadmed ruumi õhku saasteainete eest. Tõmbekapid või punktväljatõmbed (kohtaratõmbed) täidavad kaitseventilatsiooni rolli, sest tihti vajavad need suuremat õhuhulka kui liigsoojuse eemaldamise jaoks tarvis on. Sel juhul määrabki ruumi vajaliku õhuvooluhulga väljatõmbeõhu kompenseerimise vajadus sissepuhkeõhuga [4]. Praktilised kogemused näitavad, et ventilatsioon on sageli ainuke lahendus mille abil saab minimeerida ohtlikke ainete kogust õhust.

Tootmishoonete ventilatsioon on tagatud alljärgnevate enimlevinumate lahendustega:

1. Loomulik ventilatsioon:

Loomulik ventilatsioon on ruumide ventileerimise viis, mille korral ei kasutata mehaanilisi süsteeme, vaid kogu õhuvahetus on tingitud välis- ja siserõhkude ning temperatuuride erinevusest ilma õhu sundliikumise komponentideta [22, 23]. Loomulik ventilatsioon jaguneb kaheks: tuule mõjul toimiv ventilatsioon - kas ühepoolne või rist-ventilatsioon ning üleslükkejõu mõjul toimiv ventilatsioon - mida tekitavad temperatuuri ning niiskusgradienti [24]. Sellise ventilatsiooni puhul väljatõmbeõhk asendatakse välisõhuga, mis siseneb ruumi välisseintel olevate avauste, akende, uste, igasuguste avade ja pilude kaudu [4].

Eelised:

- ei vaja investeeringuid.

Puudused:

- ei lahenda suitsu- ja tolmuemaldamise probleemi täielikult;
- suured soojusenergiakulud;
- väga raskesti juhitud ja reguleeritav

2. Mehaaniline- ehk sundventilatsioon:

Antud ventilatsioon, mis kasutab õhku liikumapanemiseks ventilaatorit, vähendab õhu saasteainete kontsentratsiooni, reguleerib soojuse kogust, mis akumulatsioon kuumas tööstuslikus keskkonnas, lahjendades saastunud õhu värske, puhta ning saastamata õhuga. Selleks on vajalik aga suur õhukogus ning töötajate riskipositsioone saastunud keskkonnas

on raske hinnata. Seda süsteemi ei saa kasutada väga toksiliste kemikaalide puhul ning see lahendus ei ole tõhus tolmu või metalli aurude või suures koguses gaaside ja aurude puhul. [25]

Tööstushoonetes kasutatav mehaaniline- või sundventilatsioon jaguneb mitmeks tüübiks:

- Mehaaniline üldväljatõmbeventilatsioon;
- Mehaaniline kohtäratõmbeventilatsioon;
- Mehaaniline kohtäratõmbeventilatsioon filterseadmete baasil;
- Kombineeritud mehaaniline üldväljatõmbeventilatsioon koos kohtäratõmbeventilatsiooniga;
- Mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon;
- Mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon koos kohtäratõmbeventilatsiooniga.

Mehaaniline üldväljatõmbeventilatsioon on tavaliselt esitatud väljatõmbeventilaatoritega, mis võivad olla ühendatud ventilatsioonitorustikuga (kanaliventilaatorid) või mitte, võivad paikneda katusel (katuseventilaatorid) või seinas (seinaventilaatorid). Ventilaatorid tõmbavad ruumides asuvat õhku välja, värske asendusõhk ehk kompenseerimisõhk tuleb sisse loomulikult teel.

Eelised:

- Madalad investeerimiskulud.

Puudused:

- Kõrged soojakaod ja energiatarbimine, mis kulub värske õhu soojendamiseks vajaliku ruumitemperatuurini;
- Töölised siiski hingavad sisse saastunud toksilist õhku, sest saasteained levivad õhus enne, kui need saavad olla ventilatsiooni poolt eemaldatud. Saasteainete kontsentratsioon võib kohati ületada lubatud piirkontsentratsiooni normi;
- Värske asendusõhk ei saa piisava puhtustaset, sest ei läbi filtratsiooni etappi, mis võib olla teatud tingimustes kriitiline.

Mehaaniline kohtäratõmbeventilatsioon on ventilaatoriga ja (painduva) imutoruga varustatud väljatõmbesüsteem. Saasteained saavad olla kinnipüütud otse saasteallika juures ja ei levi ruumi õhku.

Eelised:

- Saasteainete eemaldamise kõrge efektiivsus;

- Suhteliselt madal eemaldatava õhu hulk, seega suhteliselt madalad energiakulud.

Puudused:

- Kui kasutatakse imutoru koos äratõmbe otsikuga, siis efektiivseks tööks peab äratõmbe otsik olema kaugusel mitte rohkem kui 0,5 m saasteallika juurest;
- Keerukas montaaž, kui süsteem asub suures ruumis, kus keevituskohad on seintest ja akendest kaugel;
- Soojusenergia kadu, kuna on vaja soojendada värsket asendusõhku ruumitemperatuurini;
- Värske asendusõhk ei saa piisava puhtustaset, kuna ei läbi filtratsiooni etapi, mis võib olla teatud tingimustes kriitiline.

Mehaanilisel kohtäratõmbeventilatsioonil filterseadmete baasil on eelmise süsteemiga samad eelised aga tööpõhimõtte erinevus seisneb selles, et seade kasutab õhu retsirkulatsiooni. Seadme tööpõhimõtte on selline, et väljatõmmatud saastunud õhku ei puhuta atmosfääri välja, vaid läbides filtratsioonietappi puhutakse tagasi ruumi. Niiviisi on tagatud soojusenergia sääst.

Eelised:

- Saasteainete eemaldamise kõrge efektiivsus;
- Soojusenergia kokkuhoid tänu õhu retsirkulatsiooni kasutamisele;
- Ei nõua montaaži;
- Lihtne on teisealdada tsehhis (mobiilse filterseadme juhul).

Puudused:

- Seadme filtrid vajavad aeg-ajalt vahetamist või puhastamist (vahel ka läbipesu);
- Kui kasutatakse imutoru koos äratõmbe otsikuga, siis efektiivseks tööks peab äratõmbe otsik olema kaugusel mitte rohkem kui 0,5 m saasteallika juurest;
- Et tagada piisav värskõhu kogus ruumis peab olema koostöös üldventilatsiooni süsteemiga.

Kombineeritud mehaaniline üldväljatõmbeventilatsioon koos kohtäratõmbe ventilatsiooniga on mehaaniline üldväljatõmbeventilatsioon mis on täiendatud kohtäratõmbega. Kohtäratõmbe eesmärk on püüda ohtlikud ained kinni oste saasteallika juures. Tänu sellele

ei levi need edasi ruumi ja ei ohusta ruumis olevate inimeste tervist. Kohtäratõmbeventilatsioon on lahendatud tavaliselt kas imutoru koos äratõmbe otsikuga, kubu või äratõmbe kapi baasil ja on varustatud oma väljatõmbeventilaatoriga.

Eelised:

- Õhupuhtus, saasteained saavad olla kinni püütud ja eemaldatud kohtäratõmbe poolt enne seda kui nad pääsevad ruumi õhku. Kinni püüdmata jäänud saasteaineid eemaldatakse üldväljatõmbeventilatsiooni poolt.

Puudused:

- Kõrged soojakaod ja energiatarbimine, mis kulub värske õhu soojendamiseks vajaliku ruumitemperatuurini;
- Värske asendusõhk ei saa piisava puhtustaset, kuna ei läbi filtratsiooni etappi, mis võib olla teatud tingimustes kriitiline.

Mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon energia kokkuhoiu eesmärgil põhineb soojustagastiga varustatud ventilatsiooniagregaadil. Seadme eesmärk on õhu puhastamine, soojendamine, ruumi andmine ja sealt eemaldamine. Lisaks sellele toimub agregaaadi soojustagastis õhu soojusenergia taaskasutamine rekuperatsiooni teel. Soojusvaheti või soojustagasti on üheks efektiivsemaks viisiks hoonete soojusvajaduste vähendamisel, mida kasutatakse väljatõmbel sissepuhkeõhu soojendamiseks [4].

Antud ventilatsioonilahendus sobib eelkõige tootmishoonele, kus saasteallikate kogus õhus on väga madal. Vastasel juhul tuleks esiteks vahetada väga tihti õhufiltreid, mis ei ole majanduslikult otstarbekas, ja teiseks suure koguse saasteainete eemaldamiseks õhust on vajalik kordades suurem õhuhulk, kui ainult kohtäratõmbe ventilatsioonisüsteemil. Antud lahendust on võimalik edukalt kasutada koos kohtäratõmbe ventilatsiooniga, sel juhul mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon täiendab viimast.

Eelised:

- Tööline ei pea ümber paigutama äratõmbe otsikut või kubu.

Puudused:

- Tööline hingab saastunud õhku sisse;
- Õhu puhastamiseks on vaja filtreid;

- Ventilatsiooniagregaadi filterelemendid tuleb pidevalt läbi pesta või välja vahetada.

Mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon koos kohtäratõmbe ventilatsiooniga filterseadmete baasil, on kasutusel tootmishoones, kus mingite tootmisprotsesside tõttu tekib palju saasteaineid. Kõige efektiivsem viis selliste tootmishoonete ventileerimiseks, on kombineeritud (hübriid) ventilatsioon, kus mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon teeb koostööd kohtäratõmbeventilatsiooniga filterseadmete baasil. Antud lahenduse eeliseks on see, et üldventilatsioonisüsteem ventilatsiooniagregaadi baasil tagab vajaliku värskeõhu koguse ning kvaliteedi (õhu puhtus ning temperatuur), samal ajal kui iga saasteallika juures asuvad kohtäratõmbed takistavad saasteainete leviku ruumi õhku, püüdes neid kinni otse saasteallika juures. Saasteaineid, mis jäävad kohtäratõmbe poolt kinnipüüdmata, eemaldatakse üldventilatsiooni teel. Niiviisi tagatakse normide piires olev ohtlike ainete kontsentratsioon töötsoonis ja -ruumis ning õhk jääb puhtaks ja ei tekita ohtu ruumis töötavate inimeste tervisele. Tänu ventilatsiooniagregaadi soojustagastusele ning filterseadmete õhu retsirkulatsioonile saavutatakse soojusenergia märkimisväärne kokkuhoid.

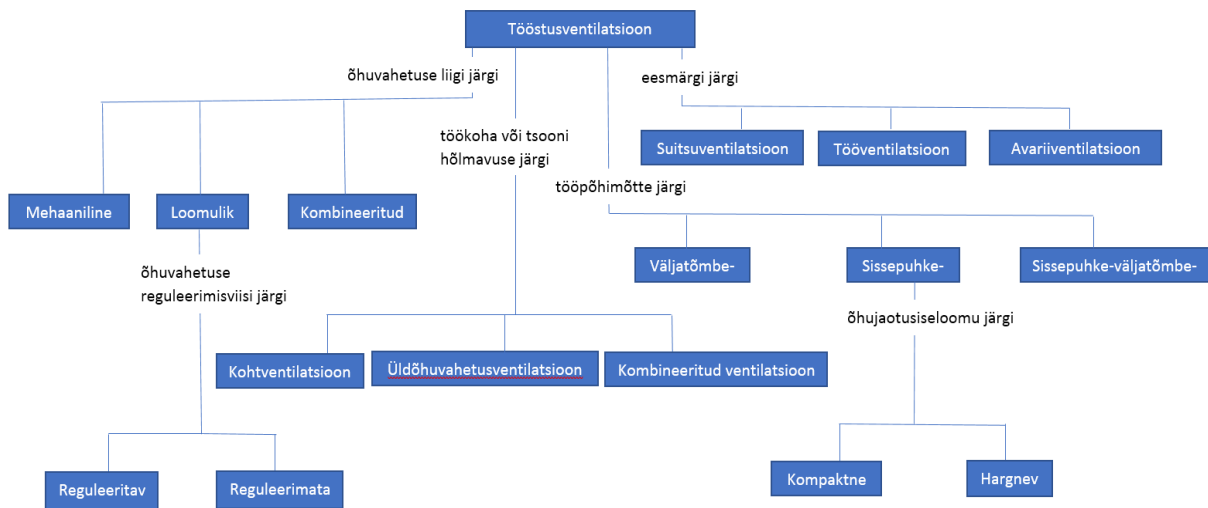
Eelised:

- Õhu puhtus, saasteained saavad olla kohtäratõmbe poolt kinnipüütud ja eemaldatud enne seda kui nad pääsevad ruumi õhku. Kinni püüdmata jäänud saasteaineid eemaldatakse üldventilatsiooni teel;
- Tänu soojustagastusele ja sooja õhu retsirkulatsioonile saavutatakse soojusenergia kokkuhoid;
- Mobiilsed filterseadmed ei vaja montaaži ja neid on lihtne tsehhis teisealdada.

Puudused:

- Õhufiltreid on vaja aeg-ajalt vahetada või puhastada;
- Filterseadmete maksumus (kohtäratõmbesüsteemidel filterseadme baasil on kahe- kolmekordne hind võrreldes ventilaatoriga varustatud kohtäratõmbesüsteemiga).

Tootmises kasutatava tööstusventilatsiooni kohta saadud informatsiooni põhjal on koostatud mõistekaart, kus on näidatud ventilatsiooni eriliigid (vt. joonis 1).



Joonis 1. Tööstusventilatsiooni mõistekaart.

Oma magistritöös olen teinud omavaliku viimase ventilatsioonisüsteemi (mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon koos kohtäratõmbe ventilatsiooniga) kasuks, kui kõige efektiivsemale saasteainete eemaldamise viisile ning teostan selle süsteemi erilahenduste energiaarvutused, et aru saada kui palju soojus- ja elektrienergiat tarbib üks ja teine lahendus, seejärel valin edasiseks projekteerimiseks välja energiasäästlikuma variandi. Valitud erilahendused on järgmised:

1. Mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioon ventilatsiooniagregaadi baasil koos väljatõmbeventilaatoriga varustatud kohtäratõmbe ventilatsiooniga;
2. Mehaaniline tsentraalne sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioon ventilatsiooniagregaadi baasil koos kohtäratõmbe ventilatsiooniga filterseadmete baasil.

4.4. Õhuvahetus keevitustööde läbiviimisel

Õhuvahetus peab olema piisav, et hoida saasteainete kontsentratsiooni lubatud tasemel ning tagada vajaliku värskõhu koguse ruumis.

Mida rohkem keevitajaid töötab ruumis, seda rohkem keevitussuitsu toodetakse. Samuti mida väiksem on ruum, seda kiiremini see täidetakse suitsuga [26]. Kevitussuitsu kontsentratsioon keevitaja töötsoonis ei tohi aga ületada 5 mg/m^3 [15].

Kohtäratõmbe abil, olgu see väljatõmbeventilaatoriga varustatud süsteem või filterseade, on see edukalt saavutatav.

4.5. Kohtäratõmbesüsteemid

Tõeliseks probleemiks keevituse ja sarnaste protsessidega seotud metalliette võtete jaoks on õhu saastumine suitsu, gaaside ja tolmu. Eelnevalt oli selgeks tehtud, et parimaks ventilatsioonilahenduseks on saasteainete eemaldamine kohe otse saasteallika juures, mis takistab saasteainete levikut mööda ruumi laiali ja, mis on eriti oluline, mööda tööliste hingamistsooni. Ka majanduslikust aspektist on see parim lahendus kuna vajab vähem energiakulusid võrreldes üldõhu vahetuse ventilatsiooniga, kus lisaks sellele ka õhusaastumise probleem ei ole täielikult lahendatud selle tõttu, et antud lahenduse põhimõte on saastunud õhu lahjendamine värske välisõhuga. Kohtäratõmbesüsteem lahendab antud probleemi ära tänu oma põhiprintsiibile - saasteainete kinni püüdmine otse tekkeallika juures ja nende edasine eemaldamine töötsoonist.

Tänu oma tõhususele leiavad kohtäratõmbesüsteemid laia kasutust erinevates tootmisvaldkondades. Enamuse keskkonda reostavate tootmisprotsesside puhul on kohtäratõmbe kasutus ainuke lahendus, mis võimaldab tagada suletud ruumis puhta õhukeskkonda minimaalsete ülesehitamise- ja edaspidiste ekspluatatsioonikuludega. Selline ventilatsioonilahendus takistab saasteainete levikut üle terve ruumi, tagab puhtama õhukeskkonda töötsoonis ja lisaks vähendab soojus- ja elektrienergiakulusid, sellepärast, et sellise lokaalse süsteemi väljatõmmatava õhu hulk on väiksem kui oleks vaja üldventilatsioonisüsteemiga sama koguse saasteainete ruumi õhust eemaldamiseks.

Keevitus ja sarnased protsessid tekitavad suitsu ja gaase, mis sissehingamisel võivad olla inimeste tervisele kahjulikud. Tihti on vajalik kontroll, et hoida kahjulikke ainete kogust lubatud tasemel. Seda võib saavutada kasutades kohtäratõmme, mis koosneb kubust (*hood*) või äratõmbe otsikust, mis on ühendatud õhukanali abil väljatõmbe- või filtratsioonisüsteemiga.

Keevitussuits tõuseb kiirusega umbes 0,3 m/s, kui töökohal esinevate tõmbetuulde kiirused on samad või suuremad. Keevitussuitsu ja gaaside efektiivne kinnipüüdmine võib olla saavutatud vaid juhul, kui eemaldatava heitõhu kiirus saasteallika juures ületab

keevitussuitsu ja tõmbetuule summaarset kiirust. Konkreetse äratõmbeseadme jaoks antud kinnipüüdmise kiirus võib olla saavutatud ainult kasutades minimaalset õhuhulga voolukiirust, mis sõltub äratõmbe otsiku (*capture device*) ristlõikepindalast ja kaugusest saasteallikast. Seega äratõmbe otsikut (kuju võib olla erinev) tuleb kasutada koos äratõmbeseadmega, mis tagab minimaalse õhuhulga voolukiiruse. [27]

Kuigi üldine soovitus on paigaldada äratõmbe otsik maksimaalselt saasteallika lähedale on mõned arvutused ja eksperimendid tõestanud, et selle paigaldamine keevitaja hingamistsooni ülemisse osasse võib efektiivsemalt vähendada nii suitsukontsentratsiooni kui ka keevisõmbeluse läbivate pooride kogust võrreldes selle paigaldamisega otse saasteallika juurde [19].

4.5.1. Õhu retsirkulatsiooni kasutatavad kohtäratõmbe süsteemid

Selleks et vähendada või täielikult välistada saasteainete sattumist ümbritsevasse keskkonda kuuluvad ventilatsioonisüsteemide koosseisu suitsu-, tolmupüüdmis- ja õhupuhastusseadmed. Selle süsteemi töökäigus puhastatud õhk tagastatakse ruumi ilma lisakuludeta soojusenergiale - nii tekib õhu retsirkulatsioon.

Õhu retsirkulatsioon on parim viis kuidas saab kokku hoida soojusenergiat ja maksimeerida investeeringute tasuvust suitsukoguja/filterseadme abil. Kui soe õhk on tagastatud ruumi selle asemel, et lasta see atmosfääri välja, elimineeritakse selle konditsioneeritud õhu asendamise maksumus ning raporteeritakse viie-kuuekordsest aasta energiakokkuhoidu õhu retsirkulatsiooni kasutamisel. [28]

Õhu retsirkulatsiooni printsiipi kasutavate kohtäratõmbesüsteemidele lisaks peab olema kasutuses ka üldõhuvahetuse ventilatsioon, et tagada vajalikud värsked õhu kogused ruumis ning eemaldada õhust kinnipüüdmata jäänud saasteained.

Eelmistes peatükkides oli vaadeldud filterseadmete eelised võrreldes „tavalise“ kohtäratõmbeventilatsiooniga. Allpool vaadeldakse filterseadmeid lähemalt.

Filterseadmed võivad olla:

1. Varustatud mehaanilise filtratsiooniga (mehaanilised filtrid):

Antud tüüpi seadmed kasutavad kiudfiltreid (*fiber filter*) ja/või kangasfiltreid (*fabric filter*) tänu nende kõrgele efektiivsusele eemaldada tahkeid saasteosakesi aktsepteeritaval tasemel. Progressiivse filtratsiooniga seadmed kasutavad mitut erinevat filtrit, kus iga järgmine on suurema efektiivsusega kui eelmine. See võimaldab eemaldada suuremaid saasteosakesi filtriga millel on madalam hind ja mis tagab kõrgema efektiivsuse ja pikema tööea. Progressiivse filtratsiooni esimeseks sammuks on tavaliselt deflektorid ehk sädemepüüdjad (*spark arrester deflectors*), mille eesmärk on tulekahju ohu tekke vältimine filtratsiooni alguses. Esimese astme vahetatav filter peab olema minimaalselt MERV6 (*Minimum Efficiency Reporting Value*), et eemaldada suuremaid saasteosakesi. MERV6 püüab kinni 35% - 49% osakestest suurusega 3-10 mikronit. Vahepealsed filtratsioonietapid peavad kasutama filtreid MERV15, kui keevitusmetall ei sisalda niklit ja/või kroomi (kui sisaldab, peab viimase filtrina olema kasutuses HEPA filter). MERV15 püüab kinni 85% - 94% osakesi suurusega 0,3-1,0 mikronit. [29]

Tüüpilised filtrid, mida kasutatakse mehaanilises filtreerimissüsteemis, on loetletud progressiivses järjekorras vähem efektiivsest efektiivsemani ja hõlmavad pestavaid metallfiltreid (neid kasutatakse sädemepüüdmises), plisseeritud filtreid (erinevad lamefiltrist mitmekordse mahtuvusega), taskufiltreid (koosnevad mitmest taskust, mis avanevad ilma teineteisevahelise kokkupuuteta) – nii on tagatud iga ruutsentimeetri kasutamine, samuti kassettfiltreid, molekulaarseid filtreid, HEPA filtreid, ULPA filtreid [30].

2. Varustatud elektrostaatilise filtratsiooniga (elektrostaatiline filter):

Elektrostaatiline filter või elektrostaatiline õhupuhasti on seade mis kasutab elektrilaengut, et eemaldada teatud lisandid – kas tahkeid osakesi või vedelaid tilkasid – õhust või muudest gaasidest suitsukorstnates või muudest suitsutorudest. Filter töötab rakendades energiat ainult osakeste kogunemiseks (kinni püüdmiseks) ilma gaasivoolu oluliselt takistamata. Esialgselt olid need filtrid kasutusel tootmisprotsessides väärtuslike materjalide väljavõtmiseks, õhusaaste kontrollimiseks ja heitgaaside osakeste osaliseks eemaldamiseks tööstusobjektides ja elektrijaamades. [31]

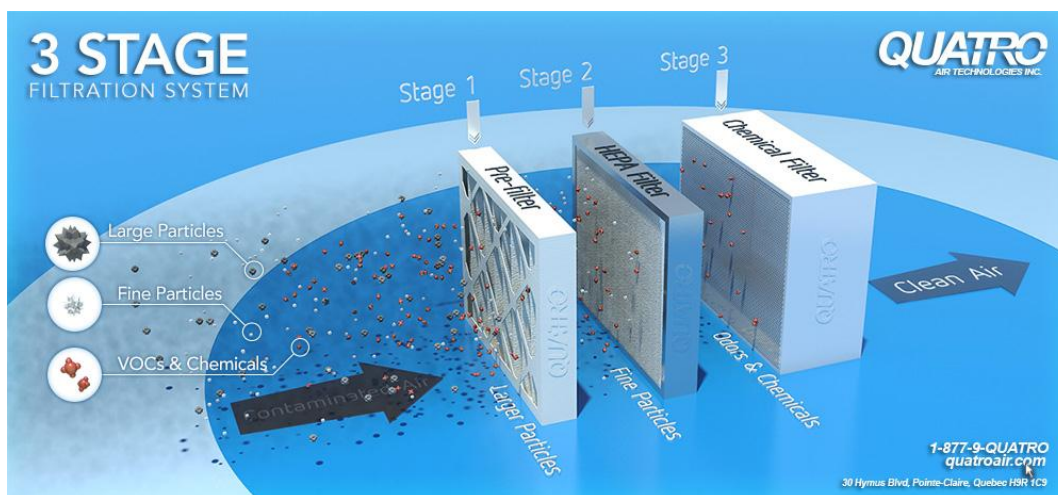
Antud tüüpi filterseadmed kasutavad retsirkulatsiooniõhu mitmeastmelist puhastamisprotsessi. Selle kollektortüübi efektiivsus sõltub filtri läbiva õhu kiirusest (madalam vool tagab kõrgema efektiivsuse), kollektori plaatide vahekaugusest ja ülekantud ionisatsioonilaengu suurusest. Lisaks sõltub selle filtri efektiivsus hoolduse intervallist, mille käigus kollektori plaate tõmmatakse ja puhastatakse. Seade tagab maksimaalse

efektiivususe siis, kui kollektori plaadid on täiesti puhtad. Retsirkuleeritud õhu jaoks soovitatakse kasutada kahekäigulist süsteemi (kahe kollektori sektsiooniga), mis tagab saasteosakeste täielikku kinnipüüdmise. [30]

3. Varustatud molekulaarse filtratsiooniga (molekulaarne filter).

Molekulaarse filtratsiooni filtrid, sellised nagu aktiveeritud söefiltrid, võivad olla lisatud selleks, et eemaldada keevitusprotsessis kindlaks määratud molekulaarsed saasteained. Standardsed aktiveeritud söefiltrid on enim levinud, kuid võib juhtuda, et töödeldud süsinik või teised spetsiaalsed vahendid on kasutusel selleks, et eemaldada spetsiifilisi molekulaarseid saasteaineid. Antud nõue määratakse kindlaks keevitusprotsessis. [30]

Joonisel 2 on näidatud eelmainitud õhu filtratsiooni etapid filterseadmes, mis on siin ära jaotatud kolmeks: eelfilter, HEPA-filter ja keemiline ehk molekulaarne filter.



Joonis 2. Filterseadme filtratsiooni etapid [32].

Filtrikassetti paigutuse konfiguratsioon seadmes võib avaldada suurt mõju filtri jõudlusele (*filter performance*) ja tööeale. Mõnedes seadmetes on filterkassetil horisontaalne paigutus, mis laseb tolmul kinnituda (*to become embedded*) filtri ülemisse ossa. Antud tingimus võib lühendada filtri tööiga ja tekitada tolmupealispinna, mis võib pritsmetest põlema minna. Seevastu vertikaalne paigutus vähendab filtrite koormust ja aitab parandada tööiga, vähendades samal ajal tule- ja plahvatusohu riski. [28]

Filterseadmed võivad olla varustatud kas ühekordsete vahetatavate filtritega või puhastatavate filtritega. Viimased seadmed on tavaliselt komplekteeritud filtri puhastamiseks nõ „raputusmehanismiga“, mille eesmärk on filtri raputamine teatud aja tagant. Selle toimetel kukuvad sadestatud osakesed selleks ettenähtud tolmu kogumiskasti, mis seejärel käsitsi eemaldatakse. Selle tulemusena on filtrid puhtamad, rõhukadusid on vähem ja energiatarbimine on madalam.

Joonisel 3 on näidatud ühe keevitussuitsu mobiilse filterseadme tööpõhimõte: alguses tõmmatakse saastunud õhk imutoru (1) abil sisse, kus see esimese asjana läbib pritsmete kinnipüüdmise etapi spetsiaalselt selleks mõeldud filtri abil (2). Seejärel läbib õhk eelfiltri (3) ja edasi kassettfiltri (4). Kinnipüütud saasteosakesed kukuvad (filtri raputamise käigus) selleks ettenähtud kogumiskasti (5). Viimase etapina läbib õhk söefiltri (6) ja tagastatakse ruumi.



Joonis 3. Mobiilne filterseade ning selle tööpõhimõte [32].

Tööstuses on levinud praktika kontrollida keevitussuitsu mõjutust kasutades selleks kohtäratõmbe seadmeid. Eriti tõhusad on need süsteemid, mis peale suitsu kinnipüüdmist ja

sellest saasteainete eraldamist, tagastavad puhastatud õhu töökohale. Oluline on, et sellistel seadmetel oleks kõrge eraldamise efektiivsus. Seadmetele mille eraldamise (filtreerimise) efektiivsus ületab 99 %, tohib nende tootja panna W3 tähise. See võimaldab kasutada neid seadmeid kroom-nikli ehk roostevaba terase keevitamisel. Kui rääkida seadme eraldamise efektiivsusest, siis see on filterseadme poolt kinni püütud osakeste massi suhe kinnipüütud osakeste massi suhtesse, mis siseneb seadmesse ettenähtud aja jooksul. [33]

4.5.2. Õhu retsirkulatsiooni mitte kasutatavad kohtäratõmbe süsteemid

Selliste kohtäratõmbesüsteemide tööprintsip erineb eelmises peatükis kirjeldatud süsteemide tööprintsibist selliselt, et siin ei toimu saastunud õhu puhastamist ja edasist tagastamist ruumi (õhu retsirkulatsiooni) vaid saastunud õhk suunatakse otse atmosfääri.

Joonisel 4 on näide ühest sellist tüüpi kohtäratõmbesüsteemist, mis koosneb imutorust koos äratõmbe otsikuga, ventilaatorist ja õhukanalist. Õhk suunatakse ilma eelpuhastamist läbimata otse atmosfääri.



Joonis 4. Kohtäratõmbesüsteem ventilaatoriga varustatud imutoru baasil [45].

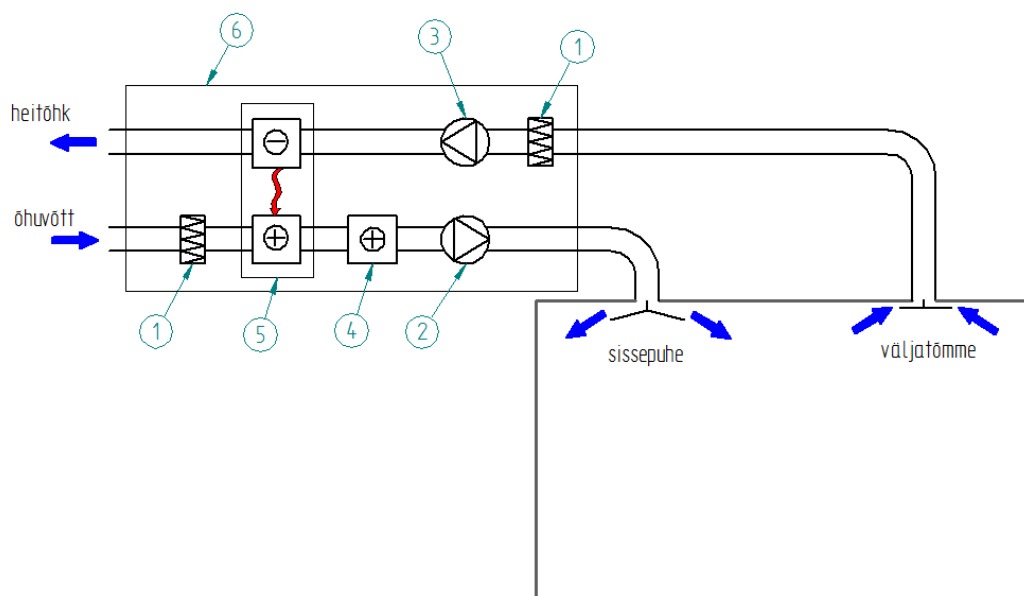
Antud kohtäratõmbesüsteemid on varustatud ventilaatoriga, mis tõmbab saastunud õhu välja ja mis on ühendatud õhukanali abil kuhu, äratõmbe otsiku, äratõmbe kapiga jms.

Sellist tüüpi kohtäratõmbesüsteemi miinuseks, kuna see ei kasuta õhu retsirkulatsiooni, on eemaldatud õhu asendusõhuga asendamine ning vajadusel selle õhu soojendamine, mille jaoks on vaja kasutada täiendavat soojusenergiat. Sellisel juhul ei saa rääkida efektiivsest energiakasutamisest.

4.6. Üldventilatsioonisüsteemid

Üldventilatsioon on ventilatsioon, millega saab ventileerida kogu ruumi. Ventilatsioonisüsteem muutub keerulisemaks, kui on vaja soojendada sissepuhkeõhku. Süsteemi keerukuse määrabki sissepuhkeõhu töötlemise vajadus, mida lisaks soojendamisele saab filtreerida, niisutada, jahutada jne [4].

Antud peatükis käsitletakse ainult mehaanilise üldventilatsioon sissepuhke-väljatõmbeseadme baasil. Joonisel 5 on näidatud sissepuhke-väljatõmbesüsteem tsentraalse ventilatsiooniagregaadi baasil. Agregaat (6) sisaldab põhiliselt: õhufiltreid (1) nii sissepuhkeõhu poole peal kui ka väljatõmbeõhu poole peal (viimane kaitseb soojustagasti reostamise eest); sissepuhke- ja väljatõmbeventilaatoreid (2 ja 3 vastavalt), kalorifeeri (4) sissepuhkeõhu soojendamiseks külmal ajal ja soojustagastit (5) sissepuhke- ja väljatõmbeõhu vahel. Antud süsteem koosneb samuti õhukanalistest ja ruumides paiknevatest õhujaotusseadmetest (plafoonidest, restidest jt). [4]



Joonis 5. Sissepuhke-väljatõmbesüsteemi skeem ventilatsiooniagregaadi baasil.

Plaatsoojustagastis kandub soojus väljatõmbeõhust sissepuhkeõhule üle, ilma et need õhuvoolud oleksid omavahel segunenud. Soojustagasti temperatuuri suhtarv η_T , mis näitab soojustagasti väljaviskeõhust soojuse eemaldamise ja sissepuhkeõhule üleandmise efektiivsust, on tavaliselt 0,6-0,8. Ühiskondlikes ja tööstushoonetes kasutatakse kaudset rekuperatiivset süsteemi, kuna sellega kõrvaldatakse risk, et väljatõmbeõhk (võib sisaldada ohtlikke ja kahjulikke aineid) võib sattuda sissepuhkeõhku. Väljatõmbe- ja sissepuhkeõhk filtreeritakse enne soojustagastit, et kaitsta soojust ülekandvaid pindu saastumise eest. [4]

5. VENTILATSIOONISÜSTEEMIDE ERILAHENDUSTE ARVUTUS

5.1. Üldist

Enne ventilatsioonisüsteemi tüübi, suuruse ja õhutöötlemisevajaduse valimist tuleb selgitada välja millised tehnoloogilised protsessid antud metallitöötlemistehhis mõjutavad sisekliimat ehk toovad endaga kaasa kõrget temperatuuri, saasteaineid, muudavad oluliselt õhuniiskust või tekitavad suurt õhuliikumiskiirust.

Tabelis 5 on näidatud antud juurdeehitatava metallitöötlemistehhi plaanitavad tehnoloogilised protsessid.

Veerus **Protsess** on näidatud tootmisprotsessi nimetus; veerus **Seade** on näidatud antud tootmisprotsessis osalev seade; veerus **Saasteained** on näidatud antud tehnoloogilise protsessi olulisemad saasteained ning veerus **Mõjutus** on näidatud selle protsessi mõjutuse tase sisekliimale, mis jaguneb kolmeks: madal, keskmine, kõrge. Kõrge mõjutusega protsessid vajavad kohest kontrolli, sest mõjutavad ning ohustavad otseselt tehhi sisekliimat. Madala mõjutusega protsesse võib arvesse mitte võtta, kuna nende mõjutuse tase sisekliimale on niivõrd madal, et ei vaja kõrvaldamiseks erimeetmeid ja neid on võimalik eemaldada üldventilatsiooni abil.

Tabel 5. TOCI OÜ uue tootmishoone metallitöötlemise tsehhi tehnoloogilised protsessid

Nr.	Protsess	Seade	Saasteained	Mõjutus
1	Lukksepp	Puurpink	Õli aurud, soojus	Madal
2	Lõikamine	Lintsaag	Õli aurud, soojus	Madal
3	Käsikeevitus (MIG/MAG, TIG protsessid)	Käsikeevitusseade	Aurud suits, soojus	Kõrge
4	Robotkeevitus (MIG/MAG protsessid)	Keevitusrobot	Aurud, suits, soojus	Kõrge
5	Krassi eemaldamine	Krassi eemaldamise masin	Soojus, tolm	Madal
6	Valtsimine	Valtspink	Soojus	Madal

Nagu on näha tabelist 5 kõige rohkem mõjutavad tsehhi sisekliimat keevitusprotsessid (käsikeevitus ja keevitusrobot). Eelpool nimetatud protsessidest ei saa loobuda, samuti ei ole võimalik vähendada nende intensiivsust või kahjulikku mõju siseõhule, seega tuleks kontrollida nende käigus eralduvate saasteainete hulka. Kõige efektiivsem viis selle saavutamiseks on püüda saasteained otse nende tekkeallika juures. Selleks tulebki kasutada kohtventilatsiooni.

Kohtventilatsiooni võib lahendada mitmel viisil – kas kasutada tõmbekappe, kohtäratõmmet (punktväljatõmme) või haarata osa kontrolltsooni alast. Väga oluline on tagada, et saasteained ei pääseks ruumi õhku ja ei hakkaks ruumide vahel levima. [4]

Antud magistritöö eesmärgiks on projekteerida energiatõhus ventilatsioonisüsteem tootmishoone (antud töö kontekstis on selleks metallitöötlemise tsehh) jaoks, kus toimub keevitus ja teised tehnoloogilised protsessid. Eelpool nimetatud eesmärgi saavutamiseks tuleb läbi viia arvutused, analüüsida ning võrrelda omavahel kahte erinevat ventilatsioonisüsteemi lahendust sealjuures tuginedes faktile, et mõlemad on mõeldud tööstushoone keevitusruumide ventileerimiseks. Selleks, et mõista kui palju energiasäästlikum on üks lahendus võrreldes teisega, võrdlen kahte erineva ventilatsioonisüsteemi energiatarvet, et aru saada kui ruttu investering energiasäästlikumatesse seadmetesse (sest võrreldavate süsteemide erinevus seisneb just seadmete erinevuses) ära tasub.

Esimene vaadeldav ventilatsioonilahendus on tänapäeval tootmises laialt levinud lahendus, kus värske õhk, mis antakse ruumi, soojendatakse vajaliku temperatuurini ventilatsiooniagregaadis; ruumis olev õhk soojendatakse vajaliku temperatuurini õhupuhurite, kalorifeeride või radiaatorite abil. Antud töös üldventilatsiooniseadmena kasutatakse plaatsoojustagastiga ventilatsiooniagregaati eemaldatava õhu mittepiisava kvaliteedi (puhtuse) tõttu. Vaatamata sellele, et rootorsoojustagastil on kõrgem kasutegur, soovitatakse seda kasutada ainult puhaste ruumide ventileerimiseks, mida tootmisruum ilmselgelt ei ole [4]. Vaadeldav ventilatsioonilahendus koosneb tsentraalsest ventilatsiooniagregaadist ja kohtäratõmmetest, milleks on statsionaarse keevituskoha jaoks mõeldud ventilaatoriga varustatud imutorud. Saastunud õhk viiakse ruumist välja kohtäratõmbe ventilaatorite abil eelpuhastatuna otse atmosfääri. Saastunud õhu eemaldamiseks on iga saasteallika juures eraldi oma kohtäratõmme. Saastunud õhk mis jääb kohtäratõmbe poolt kinni püüdmata eemaldatakse ruumist üldventilatsiooniagregaadiga. Antud lahenduse puuduseks on kõrgendatud soojusenergia tarbimine; eeliseks on aga madal maksumus ning madalad hoolduskulud. Peab mainima, et tootmises kus saasteainete (nt tolm, suits, aurud) piirkontsentratsioon ei ületa normi, piirdatakse tavaliselt sissepuhke-väljatõmbesüsteemiga ventilatsiooniagregaadi baasil, mis on varustatud ka soojustagastiga soojusenergia kokkuhoiu eesmärgil.

Teine vaadeldav ventilatsioonilahendus on energiasäästlikum lahendus, mille eesmärgiks on soojusenergia maksimaalne ärakasutamine. Antud ventilatsioonilahendus koosneb nagu esimenegi tsentraalsest sissepuhke-väljatõmbeagregaadist. Kohtäratõmbe rolli mängivad siin aga äratõmbe- ja filtreerimisseadmed ehk filterseadmed, mis tõmbavad saastunud õhu enda sisse, puhastavad tõhusate filtrite abil ning tagastavad selle ruumi. Antud süsteemi puuduseks on kõrge maksumus, plussiks on aga lihtne juhtimine ning madal soojusenergia tarbimine.

Eelmistes peatükkides on selgeks tehtud, et antud tootmishoones olulisemateks saasteallikateks esinevad käsikeevitusseadmed (MIG/MAG ja TIG protsessid) ning keevitusrobot (MIG/MAG protsess). Energiatarbimise arvutuste jaoks võtame arvesse asjaolu, et käsikeevitusseadmeid on tsehhis neli, kuid vastavalt selle tsehhi keevitustöö spetsiifikale on nende kasutustegur $k_{k,k} = 0,5$, sest käsikeevitusseadmed töötavad 50% tööajast ehk 4 tundi päevas. Keevitusrobot töötab 100% tööajast, ehk 8 tundi päevas, seega selle kasutustegur $k_{k,r} = 1,0$. Arvestades et üldventilatsiooniseade ei tööta

ööpäevaringselt, peab see olema sisse lülitatud tund aega enne tööpäeva algust [4]. Seega üldventilatsiooniseadme tööajaks on määratud 9,5 tundi päevas.

Võtame arvesse, et iga keevitusseadme juures on oma ventilaatoriga varustatud kohtäratõmbesüsteem, mida juhib automaatika, pannes selle süsteemi ventilaatori mootori käima või seisma sõltuvalt sellest kas keevitusseade on kasutuses (inimene keevitab) või mitte. Nii on tagatud efektiivne energia kasutamine. Automaatika ühendatakse kohtäratõmbeseadme ja keevitusseadme vahele ning see saab signaali keevitusseadme kasutamisest selle seadme voolukaablist, mille ümber pannakse selle automaatika andur, või fotoelemendiga andurist, mis võib olla kinnitatud kas seinale või imutoru äratõmbe otsikule. Automaatikana võib kasutada näiteks PLYMOVENT energiasäästuautomaatikat ES-90. Antud juhtseade vastutab ventilaatorite sisse- ja väljalülitamise eest ning võimaldab soovi korral väljatõmbesüsteemi ventilaatori välja lülitada viivitusega alates 7 sekundist kuni 6 minutini [44].

PLYMOVENT energiasäästuautomaatika ES-90 eelised [44]:

- Võimaldab vähendada soojusenergiakadusid kuni 80-90%;
- Elektrienergia madalad kulud ventilatsiooni süsteemi ekspluatatsioonil;
- Automaatika tasuvusaeg on kuni 1 aasta (kui keevitaja keevitab vahetuses ca. 6 tundi);
- Kohtäratõmbe maksimaalne efektiivsus;
- Väljatõmbeventilaatori minimaalne kulumine;
- Kohtäratõmbe süsteemi laienemise soovil tagab paindlikkuse.

Mõlemad eelmainitud ventilatsioonisüsteemi lahendused on vaadeldud allpool olevates punktides ükshaaval.

5.2. S-1/V-1 ventilatsioonivõrgu õhukanalite arvutus

Ventilatsioonisüsteemi projekteerimise käigus tuleb valida õhukanalid. Valikul tuleb pöörata erilist tähelepanu õhu liikumiskiirusele õhukanali sees. Need kiirused on reglementeeritud normidega, mis on kajastatud standardis EVS 906:2018. Vastavalt nendele

normidele õhu liikumiskiirus õhukanalis ei tohi ületada tabelis 6 toodud väärtusi, kuna vastasel juhul võib müratase ületada lubatud nivood [34].

Õhu liikumiskiiruse arvutamiseks õhukanalis võib kasutada kas arvutusnomogrammi [34, lk. 45] või valemit:

$$v = \frac{V}{F \cdot 3600} \quad (5.2.1)$$

kus v on õhuliikumiskiirus õhukanalis m/s;

V – õhuvool kanalis m³/h;

F – õhukanali ristlõikepind m².

Tabel 6. Suurimad lubatud õhukiirused õhukanalites m/s [35]

Kanali tüüp	Elamud	Üldkasutatavad hooned	Tööstushooned
Ühiskanal	4,5	5	10
Harukanal	3,5	4	7
Ühenduskanal	2,5	3	4

Õhukanalite dimensioneerimisel peab kindlasti arvestama tabelis 6 antud piirväärtustega.

5.3. S-1/V-1 ventilatsioonivõrgu rõhukadude arvutus

Pärast ventilatsioonisüsteemi väljajoonestamise etappi kuid enne ventilatsiooniagregaadi valikut, tuleb määrata süsteemi rõhukaod kõige pikema haru järgi ja arvutada välja kui palju rõhku on vaja õhu transportimiseks süsteemi kõige kaugema punktini või kõige kaugemast punktist [34]. Ventilatsioonivõrgu summaarne rõhukadu on süsteemi kõikide elementide rõhukadude summa.

Õhukanalite rõhukadude praktilisteks arvutamiseks kasutatakse arvutusnomogrammi [50, lk. 57].

Rõhukaod kohttakistustes (käänakud, põlved, üleminekud, hargnemised jm) on leitavad käsiraamatutest või Weisbachi valemiga [34]:

$$\Delta p_k = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (5.3.1)$$

kus Δp_k on rõhukaadu kohttakistuses Pa;

ξ – kohttakistustegur (väärtus on leitav käsiraamatutest);

ρ – õhu tihedus, $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$.

Ventilatsioonisüsteemi elementide (müra summutid, plafoonid, restid, reguleerklapid jm) rõhukaod on leitavad tootjate kataloogides sisaldavatest nomogrammidele.

Ventilatsioonivõrgu summaarse rõhukaade arvutamiseks on koostatud tabel 7, kus on näidatud ventilatsiooni elemendid ja nende rõhukaadud.

Tabel 7. S-1/V-1 ventilatsioonisüsteemi rõhukaade arvutus

S-1 sissepuhke rõhukaad				V-1 väljatõmbe rõhukaad			
Nr.	Element	Kogus	Rõhukaadu, Pa	Nr.	Element	Kogus	Rõhukaadu, Pa
1	Sissepuhkeplafoon KHDA-20-1-1	1 tk	7	1	Väljatõmberest SV1 400x200	1 tk	29
2	Reguleerklapp RK200	1 tk	27	2	Toru Ø250	2,5 m	2
3	Põlv Ø200 (90°)	1 tk	1	3	Konfuusor Ø315-Ø250	1 tk	1
4	Toru Ø200	11,0 m	6	4	Toru Ø315	27 m	40
5	Konfuusor Ø250-Ø200	1 tk	1	5	Põlv Ø315 (90°)	5 tk	50
6	Toru Ø250	6,3 m	4	6	Müra summuti BDER-44-031-120	1 tk	35
7	Konfuusor Ø315-Ø250	1 tk	1	7	Reguleerklapp RK315	1 tk	10
8	Toru Ø315	25,5 m	12	8	Tuletõkkeklapp BSD-315	1 tk	14
9	Põlv Ø315 (90°)	4 tk	30	9	Üleminek 500x300 - Ø315	2 tk	5
10	Sissepuhkeplafoon DVP 200	1 tk	35	10	Difuusor Ø315-Ø400	1 tk	6
11	Reguleerklapp RK315	2 tk	30	11	Väljaviskeotsik EYMA-2 400	1 tk	30
12	Müra summuti BDER-44-031-120	1 tk	23				
13	Tuletõkkeklapp BSD-315	1 tk	14				
14	Üleminek 500x300 - Ø315	1 tk	1				
15	Toru 500x300	1 m	1				
16	Põlv 500x300 (90°)	1 tk	15				
17	Õhuvõturest RIS 600x600	1 tk	35				
		Kokku	243			Kokku	222

S-1/V-1 ventilatsiooniagregaadi mootorite valikul ümardame saadud väärtused lähema suurema täisväärtuseni:

- summaarne rõhukadu sissepuhkesüsteemi kohttakistustes $\Delta p_{sissepuhe} = 250$ Pa;
- summaarne rõhukadu väljatõmbesüsteemi kohttakistustes $\Delta p_{väljatõmme} = 230$ Pa.

Antud andmed on kasutatud ventilatsiooniagregaadi S-1/V-1 valimisel.

5.4. Soojustagastusega ja ilma õhu retsirkulatsioonita ventilatsioonisüsteem ning selle arvutus

5.4.1. Ventilatsioonisüsteemi õhuvahetus

Antud süsteem koosneb üldõhuvahetuse tagamiseks ventilatsiooniagregaadist (püsiva õhuvooluhulgaga süsteem), mille eesmärk on tagada minimaalne vajalik õhuhulk hoone ruumides ning üksikutest igale keevitustöökohale projekteeritavatest ja oma ventilaatoriga varustatud kohtaratõmbe süsteemidest.

Hoone minimaalse arvestusliku värske õhu hulka 526 l/s (tabel 8) tagab üldventilatsioonisüsteem ventilatsiooniagregaadi baasil. Lisaks sellele on vaja saastunud õhu eemaldamiseks kohtaratõmbesüsteemidega õhuhulka, mis on võrdne 1171 l/s (tabel 8). Selle õhu kompenseerimiseks kasutatakse õhku mis tuleb tsehhi ruumi sisse loomulikult teel väljastpoolt läbi seinaga monteeritud õhuvõtturestide ning osa õhku saab sisse tulla läbi avatud värava selle kasutamise ajal. Õhukoguse 526 l/s soojendamine kuni temperatuurini +16°C kraadi toimub ventilatsiooniseadmes, ülejäänud 1171 l/s kompensatsiooniõhku soojendatakse küttesüsteemi gaasikalorifeeride poolt. Töökoja küttesüsteemi kalorifeeride termoregulaatorid on seadistatud reeglina 18°C peale ning hoiavad automaatselt etteantud ruumitemperatuuri.

Arvutustes on kasutatud järgmised lähteandmed (lisaks vt tabel 8 ja 9):

- Soojendamiseks vajalik summaarne õhuhulk: 1697 l/s;

- S-1/V-1 ventilatsiooniagregaadi elektrimootorite summaarne tarbitav võimsus: 1,304 kW (andmed seadme kohta on välja toodud lisas 1);
- V-2...V-6 kohtäratõmbe ventilaatorite elektrimootorite summaarne tarbitav võimsus: 3,75 kW;
- Aasta keskmine õhutemperatuur: +6,7°C;
- S-1/V-1 seadme sissepuhkeõhu temperatuur: +16°C.

Selleks, et teada saada antud tootmishoone ventilatsiooni summaarset vajalikku õhuhulka on koostatud tabel 8, kus on kasutatud õhuvahetuse norme, mis on saadud järgmistest standarditest:

- EVS 906:2018 „Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017“ [35];
- EVS-EN 16798-3:2017 „Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 3: Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimise süsteemidele (Moodulid M5-1, M5-4)“ [49].

Ventilatsioonisüsteemide õhuhulgad:

- S-1/V-1 süsteemi õhuhulgad on võetud ülevapool mainitud ventilatsioonistandarditest;
- V-2...V-5 süsteemide õhuhulgad on määratud imutoru tootja poolt; need peavad olema vahemikus 800-1200 m³/h [36]; lõputöös on kasutatud väärtust 1100 m³/h või 305,5 l/s;
- V-6 süsteemi õhuhulk sõltub keevitusroboti kubu parameetritest (eelkõige mõõtudest) ning see on määratud kubu tootja poolt vahemikus 2000-3200 m³/h [37]; antud töös on kasutatud väärtust 2016 m³/h või 560 l/s.

Tabel 8. Esimese lahenduse õhuvahetuse tabel

Nr.	T, °C	Nimetus	Pindala, m ²	Sissepuhe, l/s	Süsteemi nr.	Väljatõmme, l/s	Süsteemi nr.	Müratase, dB	Märkused
1	17	Kabinet	12,5	+19	S-1	-19	V-1	35	1,5 l/s·m ²
2	20	WC	2,9	s ¹	-	-20	V-1	40	20 l/s·koht
3	21	Metallitöötlemise tsehh	562,3	+507 +1171	S-1 s ¹	-487 -1171	V-1 V-2...V-6	-	Min. 0,9 l/s·m ²
		Kokku	577,7	+1697		-1697			

Märkused:

1. s on siirdeõhk l/s.

Tabel 9 sisaldab ventilatsioonisüsteemide nimetusi ja parameetreid. Seadmete parameetrid on võetud seadmete spetsifikatsioonist.

Tabel 9. Esimese lahenduse ventilatsioonisüsteemi nimetus ja parameetrid

Nr.	Süsteemi nimetus	Sissepuhe, l/s/Pa	Väljatõmme, l/s/Pa	El. mootori võimsus, kW	Kalorifeeri võimsus, kW	Filtri klass	Märkused
1	V-1	-	526/230	0,64	-	F7	kogu hoone
2	S-1	526/250	-	0,674	13,1	F7	kogu hoone
3	V-2	-	305,5/1100	0,75	-	-	käsi keevitus
4	V-3	-	305,5/1100;	0,75	-	-	käsi keevitus
5	V-4	-	305,5/1100	0,75	-	-	käsi keevitus
6	V-5	-	305,5/1100	0,75	-	-	käsi keevitus
7	V-6	-	560/250	0,75	-	-	keevitusrobot

Tabeli 9 veerus **Märkused** on kirjeldatud ventilatsioonisüsteemi kasutamise ala.

5.4.2. Energiakulu

On teada, et iga hoone vajab vajalikku sisekliima tagamiseks ning tegevusvajaduste rahuldamiseks energiat. See energia jaotatakse kolme ossa [7]:

- Soojusenergia, mis varustab üksikuid ruume, et temperatuur ei langeks alla lubatud taseme;
- Elektri- ja soojusenergia, mida vajavad KVV (küte, ventilatsiooni, jahutus) süsteemid oma tegevuseks, mis on seotud ruumi kütmisega, liigsoojuse ja saasteainete eemaldamisega;
- Elektri- ja soojusenergia, mida kasutatakse inimtegevuses vajalike seadmete ja masinate tööks, samuti valgustuseks.

Arvutused on tehtud ventilatsiooniagregaadi arvutustarkvaraga ACON (tootjalt Fläkt Group) [38]. ACON arvutustarkvaraga saadud andmete põhjal (lisa 1) on koostatud S-1/V-1 ventilatsiooniseadme parameetrite tabel 10. Tabelis on näidatud antud seadme kõige olulisemad parameetrid.

Tabel 10. S-1/V-1 ventilatsiooniseadme parameetrid

Seadme tüüp ja suurus	eQ Prime - 005
Sisepuhkeõhk	1894 m ³ /h
Väljatõmbeõhk	1894 m ³ /h
Soojustagastus	PHE, Recuterm
SFPv	2.26 kW/(m ³ /s)
Kasutegur, EN308	81.1 %
Soojendus	13.1 kW
Jahutus	0.00 kW
Sisepuhkeventilaator	0.674 kW
Väljatõmbeventilaator	0.64 kW

ACON tarkvaraga tehtud arvutuste tulemusandmete põhjal on koostatud tabel 11, kus on välja toodud andmed ventilatsiooniagregaadi energiakasutuse kohta.

Tabel 11. S-1/V-1 ventilatsiooniseadme energiakasutus

Aastane energia taastamine	Energia taastamine	Aastane lisaenergia	Energiatarve
Aastane energia efektiivsus	92%	Soojendus	1043 kW·h
Soojustagastus	11615 kW·h	Sisepuhkeventilaator	1546 kW·h
Temperatuuritõus sisepuhkeventilaatoris	1137 kW·h	Väljatõmbeventilaator	1497 kW·h
		Muud seadmed	17 kW·h
Kokku	12752 kW·h	Kokku	4103 kW·h

Arvutuste tulemused tabelis 11 näitavad, et S-1/V-1 ventilatsiooniseadme aastane energiatarve on 4103 kW·h, mis koosneb:

- Soojusenergiast, mis on saadud soojasõlmest $Q_{soojus1} = 1043 \text{ kW}\cdot\text{h}$;
- Elektrienergiast $W_{s1v1} = 3060 \text{ kW}\cdot\text{h}$.

Lõpptulemuse kogusumma saamiseks, saadud S-1/V-1 seadme andmete juurde lisame elektrienergia, mille tarbivad V-2...V-6 kohtäratõmbe ventilaatorid, samuti lisame kompensatsiooniõhu (1171 l/s) soojendamiseks vajalikku soojusenergia hulga, mis on arvutatud tarkvara ACON abil (lisa 2).

Saadud S-1/V-1 ventilatsiooniseadme elektrienergia andmete juurde lisame elektrienergia, mille tarbivad järgmised ventilatsiooniseadmed:

- Käsikeevituse kohtäratõmbe süsteemide V-2...V-5 ventilaatoriks on valitud spetsiaalsed keevitussuitsu eemaldamise ventilaatorid FUA-2100/PLYMOVENT [39]. Mootori võimsus on 0,75 kW. Ventilaatorid tagavad äratõmmatava õhuhulga 1100 m³/h rõhukao 1100 Pa juures. Ventilaatorite arv on 4 tk.
- Keevitusroboti kohtäratõmbe süsteemi V-6 ventilaatoriks on valitud keevitussuitsu eemaldamise ventilaator Plymovent FAN-28 [40]. Mootori võimsus on 0,75 kW. Ventilaator tagab äratõmmatava õhuhulga 2016 m³/h rõhukao 250 Pa juures. Ventilaatorite arv on 1 tk.

Kohtäratõmbe mootorite summaarse võrgust tarbitava võimsuse P_k leiame valemiga:

$$P_k = P_{k.k} \cdot u_{k.k} \cdot k_{k.k} + P_{k.r} \cdot u_{k.r} \cdot k_{k.r} \quad (5.4.2.1)$$

$$P_k = 0,75 \cdot 4 \cdot 0,5 + 0,75 \cdot 1 \cdot 1 = 2,25 \text{ kW}$$

kus P_k on kohtäratõmbe mootorite summaarne võrgust tarbitav võimsus kW;

$P_{k.k}$ – käsikeevituse kohtäratõmbe ventilaatori mootori võrgust tarbitav võimsus,

$$P_{k.k} = 0,75 \text{ kW};$$

$u_{k.k}$ – käsikeevituse äratõmbeventilaatorite arv, $u_{k.k} = 4$ tk;

$k_{k.k}$ – käsikeevituse kohtäratõmbe kasutustegur, $k_{k.k} = 0,5$, kuna seadmed töötavad 50% tööajast, ehk 4 tundi päevas;

$P_{k.r}$ – keevitusroboti kohtäratõmbe ventilaatori võrgust tarbitav võimsus, $P_{k.k} = 0,75 \text{ kW}$;

$u_{k,r}$ – keevitusroboti kohtäratõmmete arv, $u_{k,k} = 1$ tk;

$k_{k,r}$ – keevitusroboti kohtäratõmbe kasutustegur, $k_{k,r} = 1,0$, kuna seade töötab 100% tööajast, ehk 8 tundi päevas.

Ventilaatorite mootorite tööaeg aastas t_{aasta} on leitav valemiga:

$$t_{aasta} = t_p \cdot u_a = 8 \cdot 254 = 2032 \text{ h} \quad (5.4.2.2)$$

kus t_{aasta} on ventilaatorite mootorite tööaeg aastas h;

t_p – töötundide arv päevas, $t_p = 8$ h;

u_a – tööpäevade arv aastas, $u_a = 254$ päeva [41].

Kohtäratõmbe- ja väljatõmbeventilaatorite mootorite tarbitava elektrienergia aastas W_k leiame valemiga:

$$W_k = t_{aasta} \cdot P_k = 2032 \cdot 2,25 = 4572 \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (5.4.2.3)$$

kus W_k on kohtäratõmbe poolt tarbitav elektrienergia aastas kW·h.

Ventilatsioonisüsteemi summaarse tarbitava elektrienergia W_{el} leiame valemiga:

$$W_{el} = W_k + W_{s1v1} = 4572 + 3060 = 7632 \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (5.4.2.4)$$

kus W_{el} on ventilatsioonisüsteemi summaarne tarbitav elektrienergia aastas kW·h;

W_{s1v1} – ventilatsiooniseadme S-1/V-1 tarbitav elektrienergia aastas kW·h.

Tarbitud elektrienergia kulu maksumuse aastas H_{el} leiame valemiga:

$$H_{el} = W_{el} \cdot h_{el} = 7632 \cdot 0,12 = 915,84 \text{ EUR/aastas} \quad (5.4.2.5)$$

kus H_{el} on tarbitud elektrienergiakulu maksumus aastas EUR/aastas;

h_{el} – elektrienergia hind lõpptarbijale, EUR/kW·h; koos käibemaksuga elektrienergia hind TOCI OÜ jaoks on 0,12 EUR/kW·h [51];

Ventilatsioonisüsteemi summaarse tarbitava soojusenergia hulka Q_{soojus} leiame valemiga

$$Q_{soojus} = Q_{soojus1} + Q_{soojus2} = 1043 + 25495 = 26538 \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (5.4.2.6)$$

kus Q_{soojus} on ventilatsioonisüsteemi summaarne tarbitav soojusenergia hulk kW·h;

W_{el} – ventilatsioonisüsteemi summaarne tarbitav elektrienergia aastas kW·h;

$Q_{soojus1}$ – ventilatsiooniseadme S-1/V-1 tarbitav soojusenergia aastas kW·h;

$Q_{soojus2}$ – 1171 l/s kompensatsiooniõhu soojendamiseks vajalik soojusenergia aastas, $Q_{soojus2} = 25495$ kW·h. ACON arvutustarkvaraga saadud arv (lisa 2), mis on summa $1196 + 24299$ kW·h.

Tarbitud soojusenergia maksumuse aastas leiame valemiga:

$$H_{soojus} = Q_{soojus} \cdot h_{soojus} = 26538 \cdot 0,0342 = 907,6 \text{ EUR/aastas} \quad (5.4.2.7)$$

kus H_{soojus} on tarbitud soojusenergia maksumus aastas EUR/aastas;

h_{soojus} – soojusenergia 1 kW·h hind TOCI OÜ-s maagaasiga kütmisel,

$h_{soojus} = 0,0342$ EUR/kW·h koos käibemaksuga [52].

Esimese ventilatsioonilahenduse summaarse aastase energiakulu maksumuse H_1 leiame valemiga:

$$H_1 = H_{el} + H_{soojus} = 915,84 + 907,6 = 1823,44 \text{ EUR/aastas} \quad (5.4.2.8)$$

kus H_1 on ventilatsioonisüsteemi summaarne aasta energiamaksumus EUR/aastas.

Antud ventilatsioonilahenduse summaarseks aastaseks energiakulu maksumuseks on saadud 1823,44 EUR.

5.5. Soojustagastusega ja õhu retsirkulatsiooniga ventilatsioonisüsteem ning selle arvutus

5.5.1. Ventilatsioonisüsteemi õhuvahetus

Antud ventilatsioonisüsteem koosneb sissepuhke-väljatõmbeagregaadist (püsiva õhuvooluhulgaga süsteem), mis tagab üldõhuvahetuse varustades hoone ruume minimaalse vajaliku värsket õhu kogusega. Lisaks sellele koosneb süsteem ka üksikutest eraldi seisvatest filterseadmetest, mille eesmärk on puhastada/filtreerida siseneva saastunud õhk ja tagastada seejärel ruumi (õhu retsirkulatsioon). Filterseadmete kogus on 5 tk – neli teenindavad

üksikuid keevituskohti ja üks seade teenindab keevitusrobotit . Antud süsteemi energiasääst saavutatakse lisaks ventilatsiooniagregaadi soojustagastusele ka tänu filterseadmete õhu retsirkulatsioonile.

Arvutustes on kasutatud järgmised lähteandmed (lisaks vt tabel 12 ja 13):

- Soojendamiseks vajalik õhuhulk on 526 l/s;
- S-1/V-1 ventilatsiooniagregaadi elektrimootorite summaarne tarbitav võimsus on 1,304 kW (andmed seadme kohta on välja toodud Lisas 1);
- V-2...V-6 süsteemide filterseadmete ventilaatorite elektrimootorite summaarne tarbitav võimsus on 5,5 kW;
- Aasta keskmine õhutemperatuur +6,7°C;
- S-1/V-1 seadme sissepuhkeõhu temperatuur: +16°C.

Selleks, et teada saada antud tootmishoone ventilatsiooni summaarset vajalikku õhuhulka on koostatud tabel 12, kus on kasutatud õhuvahetuse norme, mis on saadud järgmistest standarditest:

- EVS 906:2018 „Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017“ [35];
- EVS-EN 16798-3:2017 „Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 3: Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimise süsteemidele (Moodulid M5-1, M5-4)“ [49].

Ventilatsioonisüsteemide õhuhulgad:

- S-1/V-1 süsteemi õhuhulgad on võetud ülalmainitud ventilatsioonistandarditest;
- V-2...V-5 süsteemide õhuhulgad on määratud filterseadmete tootja poolt; õhuhulk on maksimaalselt 1200 m³/h [42]; antud arvutuses on kasutatud sama väärtust nagu esimeses lahenduses: 1100 m³/h või 305,5 l/s;
- V-6 süsteemi õhuhulk sõltub keevitusroboti kubu parameetritest (eelkõige mõõtudest) ning see on määratud kubu tootja poolt vahemikus 2000-3200 m³/h [37]; käesolevas töös on kasutatud väärtust 2016 m³/h või 560 l/s.

Tabel 12. Teise lahenduse õhuvahetuse tabel

Nr.	T, °C	Nimetus	Pindala, m ²	Sissepuhe, l/s	Süsteemi nr.	Väljatõmme, l/s	Süsteemi nr.	Müratase, dB	Märkused
1	21	Kabinet	12,5	+19	S-1	-19	V-1	35	1,5 l/s·m ²
2	20	WC	2,9	s ¹	-	-20	V-1	40	20 l/s·koht
3	18	Metallitöötlemise tsehh	562,3	+507	S-1	-487	V-1	-	Min. 0,9 l/s·m ²
		Kokku	577,7	+526		-526			

Märkused:

1. s on siirdeõhk l/s;

2. V2...V6 kohtaratõmbe süsteemid ei ole lisatud tabelisse, kuna need retsirkuleerivad õhku.

Tabel 13 sisaldab ventilatsioonisüsteemide nimetusi ja parameetreid. Parameetrid on võetud seadmete spetsifikatsioonist.

Tabel 13. Teise lahenduse ventilatsioonisüsteemi nimetus ja parameetrid

Nr.	Süsteemi nimetus	Sissepuhe, l/s/Pa	Väljatõmme, l/s/Pa	El. mootori võimsus, kW	Kalorifeeri võimsus, kW	Filtri klass
1	V-1	-	526/230	0,64	-	F7
2	S-1	526/250	-	0,674	13,1	F7
3	V-2	305,5 l/s	305,5 l/s	1,1	-	E12 + eelfilter
4	V-3	305,5 l/s	305,5 l/s	1,1	-	E12 + eelfilter
5	V-4	305,5 l/s	305,5 l/s	1,1	-	E12 + eelfilter
6	V-5	305,5 l/s	305,5 l/s	1,1	-	E12 + eelfilter
7	V-6	560 l/s	560 l/s	1,1	-	≥99% HEPA

Tabelis 13 esitatud süsteemid V2...V6 on olemas nii veerus **Sissepuhe** kui ka **Väljatõmme** seoses sellega, et nende kasutamisel toimub nii õhuvõtt kui ka samal ajal väljavise. Nende süsteemide rõhukadu ei ole antud, sest ventilaatorit siin ei valita vaid seade on juba sellega varustatud.

5.5.2. Energiakulu

Ventilatsiooni energiakulu arvutused on tehtud ventilatsiooniagregaadi arvutustarkvaraga ACON (Fläkt Group) [38]. Saadud andmete põhjal (vt Lisa 1) on koostatud seadme parameetrite tabel 10. Selles tabelis on näidatud ventilatsiooniseadme S-1/V-1 kõige olulisemad parameetrid. Arvutustarkvaraga tehtud arvutuse tulemusandmete põhjal on koostatud tabel 11, kus on välja toodud andmed ventilatsiooniagregaadi energiakasutuse kohta.

Arvutuste tulemused tabelis 11 näitavad, et S-1/V-1 ventilatsiooniseadme aastane energiatarve on 4103 kW·h, mis koosneb:

- Soojusenergiast, mis on saadud soojasõlmest $Q_{soojus1} = 1043 \text{ kW}\cdot\text{h}$;
- Elektrienergiast $W_{s1v1} = 3060 \text{ kW}\cdot\text{h}$.

Saadud ventilatsiooniseadme andmete juurde lisame elektrienergia, mille tarbivad järgmised filterseadmed:

- Filterseade V-2...V-5 (käsikeevitus) PLYMOVENT MobilePro [42]. Tarbitav võimsus $P_{f.k} = 1,1 \text{ kW}$; filtreeritav õhuhulk on 1100 m³/h. Seadmete arv on 4 tk.
- Filterseade V-6 (keevitusrobot) TEKA AirFill [43]. Tarbitav võimsus $P_{f.r} = 1,1 \text{ kW}$; filtreeritav õhuhulk on 2016 m³/h. Seadmete arv on 1 tk.

Filterseadmete summaarse võrgust tarbitava võimsuse leiame valemiga:

$$P_f = P_{f.k} \cdot u_{f.k} \cdot k_k + P_{f.r} \cdot u_{f.r} \cdot k_r = 1,1 \cdot 4 \cdot 0,5 + 1,1 \cdot 1 \cdot 1 = 3,3 \text{ kW} \quad (5.5.2.1)$$

kus P_f on filterseadmete summaarne võrgust tarbitav võimsus kW;

$P_{f.k}$ – käsikeevituse filterseadme võrgust tarbitav võimsus, $P_{f.k} = 1,1 \text{ kW}$;

$u_{f.k}$ – käsikeevituse filterseadmete arv, $u_{f.k} = 4 \text{ tk}$;

$k_{k.k}$ – käsikeevituse filterseadmete kasutustegur, $k_{k.k} = 0,5$ on saadud tingimusest, et seadmed töötavad 50% tööajast, ehk 4 tundi päevas;

$P_{f.r}$ – keevitusroboti filterseadme võrgust tarbitav võimsus, $P_{f.r} = 1,1 \text{ kW}$;

$u_{f.r}$ – keevitusroboti filterseadmete arv, $u_{f.r} = 1 \text{ tk}$;

$k_{k.r}$ – keevitusroboti filterseadme kasutustegur, $k_{k.r} = 1,0$ on saadud tingimusest, et seade töötab 100% tööajast, ehk 8 tundi päevas.

Filterseadmete tööaeg aastas t_{aasta} on leitav valemiga:

$$t_{aasta} = t_p \cdot u_a = 8 \cdot 254 = 2032 \text{ h} \quad (5.5.2.2)$$

kus t_{aasta} on ventilaatorite mootorite tööaeg aastas h;

t_p – töötundide arv päevas, $t_p = 8 \text{ h}$;

u_a – tööpäevade arv aastas, $u_a = 254$ päeva [41].

Filterseadmete aastase tarbitava energia W_f leiame valemiga:

$$W_f = t_{aasta} \cdot P_f = 2032 \cdot 3,3 = 6705,6 \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (5.5.2.3)$$

kus W_f on filterseadmete aastane tarbitav elektrienergia kW·h.

Ventilatsioonisüsteemi summaarse tarbitava elektrienergia aastas W_{el} leiame valemiga:

$$W_{el} = W_f + W_{s1v1} = 6705,6 + 3060 = 9765,6 \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (5.5.2.4)$$

kus W_{el} on ventilatsioonisüsteemi summaarne aastane tarbitav elektrienergia kW·h;

W_{s1v1} – ventilatsiooniseadme S-1/V-1 tarbitav aasta elektrienergia kW·h.

Tarbitud elektrienergia kulu aastase maksumuse H_{el} leiame valemiga:

$$H_{el} = W_{el} \cdot h_{el} = 9765,6 \cdot 0,12 = 1171,87 \text{ EUR/aastas} \quad (5.5.2.5)$$

kus h_{el} on elektrienergia hind lõpptarbijale EUR/kW·h; koos käibemaksuga elektrienergia hind TOCI OÜ jaoks on 0,12 EUR/kW·h [51];

H_{el} – tarbitud energiakulu maksumus aastas EUR/aastas.

Tarbitud soojusenergia maksumuse aastas H_{soojus} leiame valemiga:

$$H_{soojus} = Q_{soojus} \cdot h_{soojus} = 1043 \cdot 0,0342 = 35,67 \text{ EUR/aastas} \quad (5.5.2.6)$$

kus H_{soojus} on tarbitud soojusenergia maksumus aastas EUR/aastas;

h_{soojus} – on soojusenergia 1 kW·h hind TOCI OÜ jaoks maagaasiga kütmisel,

$h_{soojus} = 0,0342 \text{ EUR/kW}\cdot\text{h}$ koos käibemaksuga [52].

Teise ventilatsioonilahenduse summaarse aastase energiakulu maksumuse leiame valemiga:

$$H_2 = H_{el} + H_{soojus} = 1171,87 + 35,67 = 1207,54 \text{ EUR/aastas} \quad (5.5.2.7)$$

kus H_2 on soojustagastusega ja õhu retsirkulatsiooniga ventilatsioonilahenduse summaarne aastane energiamaksumus EUR/aastas.

Antud ventilatsioonilahenduse summaarseks aastaseks energiakulu maksumuseks on saadud 1207,54 EUR.

5.6. Ventilatsioonisüsteemide erilahenduste võrdlusanalüüs

5.6.1. Energiakulu võrdlus

Selleks, et leida kui palju vähem energiat tarbib energiasäästlikum lahendus tuleb võrrelda omavahel kahe lahenduse energiakulusid, mis sisaldavad soojusenergia ja elektrienergia kulusid.

Esimese ehk soojustagastusega aga ilma õhu retsirkulatsioonita ventilatsioonilahenduse aastane tarbitav energiakulu maksumus on $H_1 = 1823,44$ EUR/aastas.

Teise ehk soojustagastusega ja koos õhu retsirkulatsiooniga ventilatsioonilahenduse aastane tarbitav energiakulu maksumus on $H_2 = 1207,54$ EUR/aastas.

Leiame energiasäästlikuma lahenduse aastase säästu a võrdluses vähem energiasäästliku lahendusega valemist:

$$a = H_1 - H_2 = 1823,44 - 1207,54 = 615,9 \text{ EUR/aastas} \quad (5.6.1.1)$$

kus a on aastane energiasääst EUR/aastas.

Arvutus näitab, et soojustagastusega ja õhu retsirkulatsiooniga ventilatsioonilahenduse kasutamisest tingitud aastane energiasääst on 615,9 EUR võrreldes vähem energiasäästliku lahendusega.

5.6.2. Hinnavõrdlus

Selles peatükis uuritakse ja võrreldakse ventilatsiooni erilahenduste investeerimiskulusid. Kuna erilahendused koosnevad erinevatest seadmetest (va S-1/V-1 süsteem ventilatsiooniagregaadi baasil), siis on erinevad ka nende investeerimiskulud. Vaatleme neid lähemalt:

- S-1/V-1 üldventilatsioonisüsteemi jätame hinnavõrdlusest välja, kuna antud süsteem on mõlemal lahendusel sama ning ei mõjuta erilahenduste hinnaerinevust;
- V-2...V-6 süsteemide hinnad sisaldavad esimese lahenduse puhul õhukanalite, ventilaatorite ning imutorude hindu. Teise lahenduse puhul on aga täiskomplektseid (kõiki töö jaoks vajalikke komponentidega) filterseadmete hindu. Kahe kohtäratõmbesüsteemi lahenduse erinevus lisaks seadmetele seisneb ka esimese lahenduse puhul süsteemi montaažis, mida teise lahenduse puhul ei ole, kuna lõputöös kasutatud mobiilsed filterseadmed ei vaja montaaži. Samuti ei ole väljatoodud ka Plymovent ES-90 energiasäästuautomaatika hinda, kuna see on mõlemal lahendusel sama, seega ei mõjuta hinnaerinevust.

1. Soojustagastusega ja ilma õhu retsirkulatsioonita lahendus:

Tabelis 14 on näidatud antud ventilatsioonilahenduse kohtäratõmbe seadmete hinnad. Antud lahenduse summaarne hind koosneb ventilaatorite ja imutorude hinnast. V-6 süsteemi õhukanalite, keevitusroboti kubu ja muude ventilatsioonielementide hinnad ei ole siin välja toodud, kuna need on mõlemal lahendusel samad.

Tabel 14. Ilma õhu retsirkulatsioonita ventilatsioonilahenduse hinnakalkulatsiooni tabel

Nr.	Nimetus	Mark/tootja	Õhuhulk, m³/h	Mootori võimsus, kW	Kogus, tk.	Hind¹, EUR
1	Väljatõmbeventilaator	FUA-2100/ PLYMOVENT	1100	0,75	4	636
2	Väljatõmbeventilaator	FAN-28/ PLYMOVENT	2016	0,75	1	816
3	Imutoru liigendiga (4m)	KUA-4S/ PLYMOVENT	-	-	4	636
					Kokku	2088

Märkused:

1. Seadmete hinnad on võetud tootja kodulehelt või seadmete kohalikku edasimüüja hinnapakumisest ja ümardatud täisväärtuseni. Hinnad sisaldavad käibemaksu.

Antud ventilatsioonilahenduse kohtäratõmbe süsteemide summaarne maksumus on 2088 EUR.

2. Soojustagastusega ja õhu retsirkulatsiooniga lahendus:

Tabelis 15 on näidatud antud ventilatsioonilahenduse kohtäratõmbe komplektsete seadmete hinnad. V-6 süsteemi õhukanalite, keevitusroboti kubu ja muude ventilatsioonielementide hinnad ei ole siin välja toodud, kuna need on mõlemal lahendusel samad.

Tabel 15. Õhu retsirkulatsiooniga kohtäratõmbe ventilatsioonilahenduse hinnakalkulatsiooni tabel

Nr.	Nimetus	Mark/tootja	Õhuhulk, m³/h	Mootori võimsus, kW	Kogus, tk.	Hind¹, EUR
1	Filterseade	MobilePro/PLYMOVENT	1100	1,1	4	2310
2	Filterseade	AirFill + Automatic cleaning/TEKA	2016	1,1	1	2770
					Kokku	5080

Märkused:

1. Seadmete hinnad on võetud tootja kodulehelt või seadmete kohalikku edasimüüja hinnapakumisest ja ümardatud täisväärtuseni. Hinnad sisaldavad käibemaksu.

Antud ventilatsioonilahenduse kohtäratõmbe süsteemide summaarne maksumus on 5080 EUR.

5.6.3. Tasuvusarvutus

Projekteerimisstaadiumil kasutatakse tavaliselt majandusliku tasuvuse hindamist selleks, et [4]:

1. Investeeringute tegemise otsustamisel teha õige valik;
2. Lõpptulemusena oleksid valitud ja dimensioneeritud õiged tehnilised süsteemid või nende osad.

Mõlemal juhul mängivad olulist rolli kapitali väärtuse küsimus käesoleval hetkel võrreldes tulevaste tulude saavutamistega või siis tulevaste kulude vähendamine. Erinevad investeeringud on erineva elueaga. Hoonete puhul on see tavaliselt 40-50 aastat aga tehniliste süsteemide puhul, olgu selleks siis kütte-, ventilatsiooni-, jahutus- või valgustussüsteemid, tuleb arvestada 10-20 aastase elueaga. Kui investeeringute jaoks võetakse laenu, on ka intressi arvesse võtmine arvutuste jaoks tähtis. [4]

Antud töös ei ole intressiga arvestatud, kuna TOCI OÜ tehnosüsteemidesse tehtavate investeeringute jaoks ei plaanita kasutada laenu.

On olemas erinevad tasuvusaja meetodid, mida saab kasutada investeeringute teostamise otsuse aluseks, nagu näiteks [4]:

- Tasuvusaja (*pay back*) meetod;
- Nüüdisväärtuse (*net present value*) meetod;
- Võrdsete aastamaksete meetod;
- Tulu sisenormi meetod (*internal rate of return*).

Antud töös kasutatakse tulemuste saamiseks tasuvusaja meetodit. Tasuvusaja meetodi puhul on tasuvusajaks periood, mille jooksul plaanitava investeeringu algmaksumus tasustatakse sellest saadavate tulude või säästudega. Keskendutud on diskonteerimata ehk lihttasuvusaja meetodile, mille puhul arvesse ei võeta intressi ega raha väärtuse muutust ajas. Antud

meetod on lihtne, kergesti arusaadav ja annab tugeva eelise, kui küsimus käib lühikese elueaga investeringutest. [4]

Diskonteerimata tasuvusaeg ehk lihttasuvusaeg T leitakse valemiga [4]:

$$T = \frac{B_o}{a} \quad (5.6.3.1)$$

kus T on diskonteerimata tasuvusaeg aastat;

B_o – investeering EUR;

a – aastane energiasääst EUR/aastas.

Tuleb pöörata tähelepanu tingimusele, et tasuvusaeg peab olema lühem kui määratud tasuvusaja ülempiir $T_{\bar{u}}$ [4]:

$$T < T_{\bar{u}} \quad (5.6.3.2)$$

kus $T_{\bar{u}}$ on tasuvusaja ülempiir aastat.

Analüüsime kui kiiresti üks lahendus tasub ennast ära võrdluses teise lahendusega. Selleks kõigepealt tuleb leida energiatõhusama lahenduse lisainvesteeringu B_o summa valemiga:

$$B_o = \text{Lahendus 2} - \text{Lahendus 1} = 5080 - 2088 = 2992 \text{ EUR} \quad (5.6.3.3)$$

kus Lahendus 2 on teise ventilatsioonilahenduse summaarne maksumus EUR,

Lahendus 2 = 5080 EUR;

Lahendus 1 – esimese ventilatsioonilahenduse summaarne maksumus EUR,

Lahendus 1 = 2088 EUR.

Arvutus näitab, et esimene lahenduse summaarne maksumus on 2992 EUR madalam kui teine lahendus.

Leiame kui kiiresti antud hinnavahe tasub ennast ära kui võtta arvesse, et energiatõhusama lahenduse kasutamine toob aastas energiasäästu 615,9 EUR võrreldes vähem energiatõhusama lahenduse kasutamisega.

Energiatõhusama süsteemi diskonteerimata tasuvusaja T leiame valemiga (vt valem 5.6.3.1):

$$T = \frac{2992}{615,9} = 4,86 \text{ aastat, mis ümberarvutuses teeb ca. 4 aastat ja 10 kuud.}$$

Tulemuseks saime, et energiatõhusama ventilatsioonilahenduse diskonteerimata tasuvusaeg T võrdluses teise ventilatsioonilahendusega on ca. 4 aastat ja 10 kuud.

Kui võtta arvesse, et filterseadmete prognoositav eluiga on 10-20 aastat määrame minimaalseks tasuvusaja ülempiiriks $T_{\bar{u}}$ 10 aastat.

$4,86 < 10$ seega tingimus $T < T_{\bar{u}}$ on täidetud.

Arvutusse ei ole lisatud ventilatsiooniagregaadi hoolduskulud, kuna need on mõlemal lahendusel samad ja teevad ca. 3...5% aastas seadme hinnast, mis S-1/V-1 seadme puhul ca. 500 EUR aastas. Samuti ei ole arvutusse lisatud filtrite vahetuse kulu, mida teostatakse filterseadmete puhul kord 2-4 aasta jooksul ja uue filtri hind on ca 300 EUR koos käibemaksuga [48]. Kohtäratõmbesüsteemide õhukanalite puhastust tehakse vastavalt tellija vajadusele ja tuginedes praktikale mitte tihedamini kui kord paari aasta jooksul. Nende lisakuludega on keeruline arvestada, sest täpsed andmed nende kulude kohta puuduvad. Seega on arvestatud ainult ventilatsioonilahenduste hinnaerinevuse ja energiasäästuga.

6. VENTILATSIOONISEADME ALUSRAAMI PROJEKTEERIMINE

6.1. Sissejuhatus

S-1/V-1 ventilatsiooniagregaadi paigaldamiseks on mõeldud vahekorrusel asuv ventilatsiooniruum. Probleem on selles, et antud ruumis on juba olemas üks ventilatsiooniseade, mis teenindab olemasolevat hoonet. Selle probleemi lahendamiseks on vaja projekteerida alusraam S-1/V-1 seadmele, mis hakkab teenindama juurdeehitatavat hoonet ning mis võimaldab paigaldada uue ventilatsiooniseadme olemasoleva seadme kohale.

Praegu kasutusel oleva ventilatsiooniseadme kõrgus on 1000 mm, laius on 700 mm ja pikkus on 2300 mm, mis tähendab, et uus ventilatsiooniseadme alusraam peab mahutama enda sisse vana seadme, olles samal ajal piisavate mõõtudega, et uue seadme saaks paigaldada selle peale. Lisaks peaks projekteeritav raam olema ka piisavalt tugev, et vastu pidada koormusele ning tagama juurdepääsu vana seadme hooldamiseks.

Antud peatükis projekteeritakse ja analüüsitakse alusraami ning arvutatakse selle tugevus. Sellise uurimise läbiviimiseks kasutatakse projekteerimistarkvara *Solid Edge Simulation* keskkonda. Antud tarkvara kasutab *FEMAP* protsessorit koos *NX Nastran* - lõplike elementide lahendajaga. *NX Nastran* on tootmisstandard kõrgtootlike arvutuste valdkonnas aerokosmose-, laevaehituse-, autotööstuse- ja teiste tootmisvaldkondade jaoks. Kasutades *Solid Edge Simulation* keskkonda ei vaja insener põhjalikke oskusi lõplike elementide analüüsimiseks. Arvutustarkvara võimaldab koostada ja täita nii koostude kui ka üksikdetailide staatilisi, modaalseid, tasakaalu kao vormide otsimise ja statsionaarseid soojusanalüüse.

6.2. Ülesande püstitus

Eesmärgiks on projekteerida alusraam ventilatsiooniseadmele ja LEM (lüh. lõplike elementide meetod) meetodit kasutades läbi viia projekteerimistarkvara *Solid Edge Simulation* abil selle alusraami tugevusanalüüsi uuring: selgitada välja deformatsioonide suurus, siirded (*displacement*) ja tugevusvaru tegur (*factor of safety*). Need analüüsid on vajalikud selleks, et veenduda projekteeritud alusraami eesmärgipärasuses ja kasutusohutuses.

Alusraami projekteerimisel ning edasise tugevusarvutuse läbiviimisel arvestame sellega, et selle tugevusvarutegur oleks minimaalselt 1,2 [46].

6.3. Lähteandmed

Arvutuses on kasutatud järgmised lähteandmed:

- Alusraamile mõjuv jõud on seadme mass: 550 kg või 5,4 kN;
- Gabariitmõõdud: 2600x772x1113 mm (PxLxK);
- Sisemõõdud min.: 2300x650x1000 (PxLxK).

6.4. Projekteerimine

Alusraami projekteerimiseks on kasutatud projekteerimistarkvara *Solid Edge*. Projekteeritava alusraami materjaliks on valitud terastoru marki S355J0. Projekteerimisel peab arvesse võtma, et alusraami suuruse määravad ventilatsiooniseadme jalad, mis on pikkusega 2600 mm, paksusega 58 mm ja välimisest servast võetud kahe jala vaheline mõõt, mis on 772 mm. Seadme mõõdud ning mass on võetud S-1/V-1 seadme spetsifikatsioonist (lisa 1).

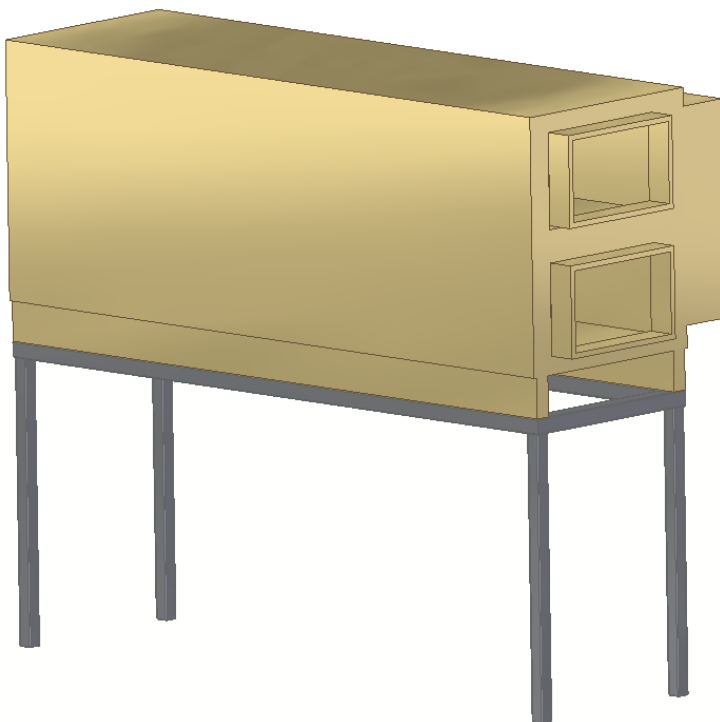
Lähtuvalt sellest valime ülemise osa jaoks toru mõõduga 60x60x3,2, et seadme jalad saaksid sellele tervenisti toetuda. Raamile on projekteeritud neli jalga väiksemast torust mõõduga 50x50x3,2 et lihtsustada keevitamisprotsessi.

Kui LEM meetodi analüüsi käigus selgub, et torud ei ole piisavalt tugevad, tuleb need asendada kas suurema või paksema seinaga torude vastu ja seejärel analüüsi korrata.

Joonisel 6 on näidatud projekteeritud alusraam koos selle peal asetseva ventilatsiooniagregaadiga.

Projekteeritud alusraami arvutuslikuks massiks on saadud 58,2 kg. Kuna alusraami elementide ühendamiseks on mõeldud keevitus, siis edaspidi selle väärtuse juurde lisandub keevise kaal.

Projekteeritud alusraami joonised on välja toodud lisas 6.

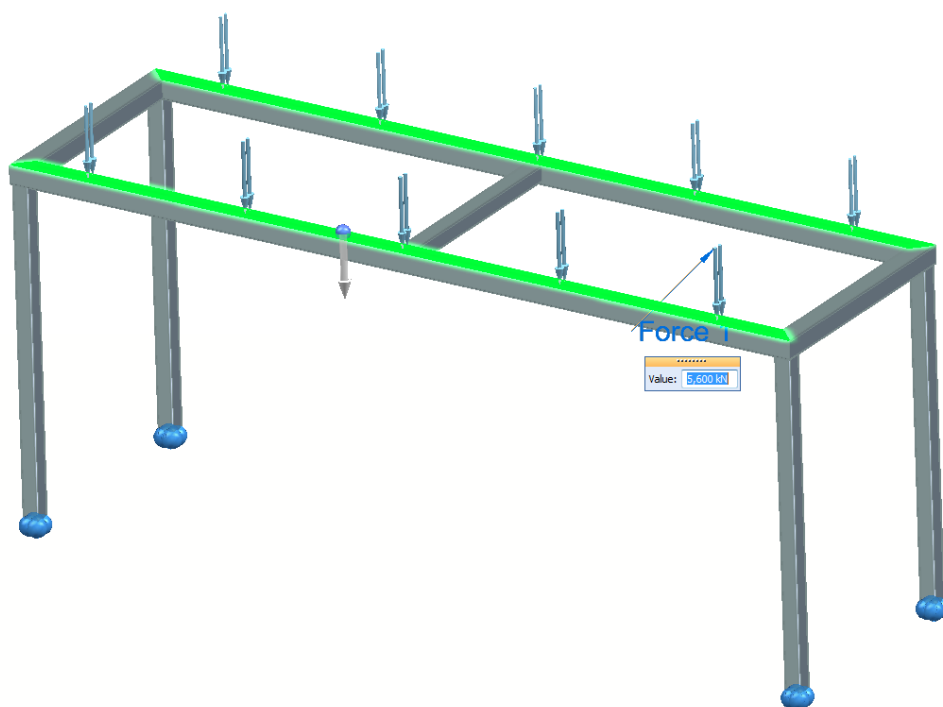


Joonis 6. S-1/V-1 ventilatsiooniagregaat projekteeritaval alusraamil.

6.5. Lahenduskäik (arvutused)

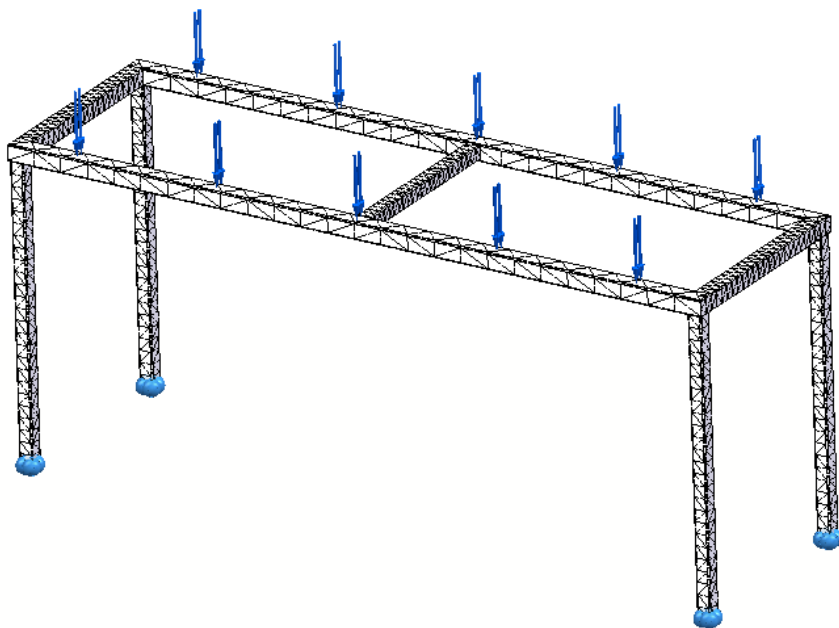
Pärast alusraami projekteerimist, saab koostada 3D mudeli kasutades tugevusarvutus LEM meetodil *Solid Edge Simulation* keskkonnas.

Alusraamile mõjuv jõud 5,6 kN on suunatud allapoole ja selle asukohaks on kahe pikema toru pealispinnad (joonis 7), millel jõud on ühtlaselt ärajaotatud. Jalgade tugipinnad on fikseeritud käsu *pinned* abil.



Joonis 7. Alusraam koos rakendatud jõududega ja fikseeritud jalgadega.

Järgmine etapp on detailile võrgu (*Mesh*) loomine *Mesh* käsu abil - programm lubab valida peenema ja jämedama võrgu vahel. Asetame kursori keskelt peenema võrgu poole, mis annab täpsema tulemuse. Joonisel 8 on näidatud alusraam koos rakendatud võrguga.



Joonis 8. Alusraami mudel koos näidatud võrguga, jõu vektori suunaga ja fikseeritud jalgadega.

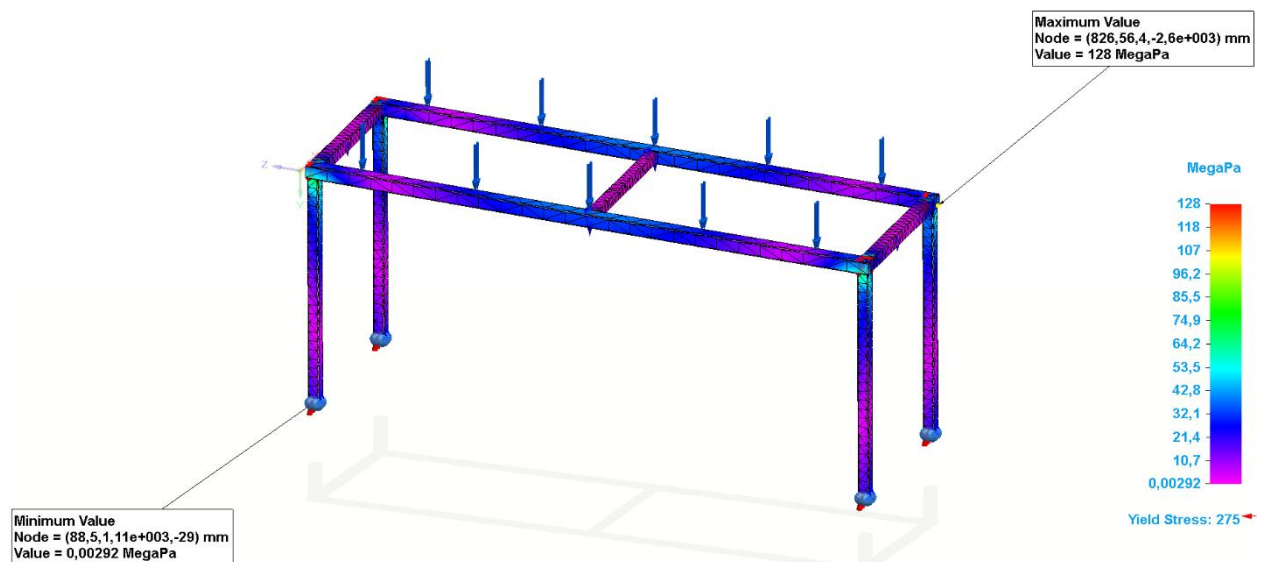
6.6. Tulemused ning nende analüüs

Viimases etapis käsuga *Solve* käivitatakse mooduli *NX Nastran*, mis annab vajalikud tulemused. Pärast käsku *Solve* täitmist kuvab programm arvutuste vastused uues aknas.

Joonisel 9 on näidatud pingete intensiivsus (*Von Mises Stress*). Seda tüüpi pingeid kasutatakse laialt inseneride poolt, et kontrollida ja veenduda, et nende projekteeritud konstruktsioon talub ettenähtud pinge kriteeriumit.

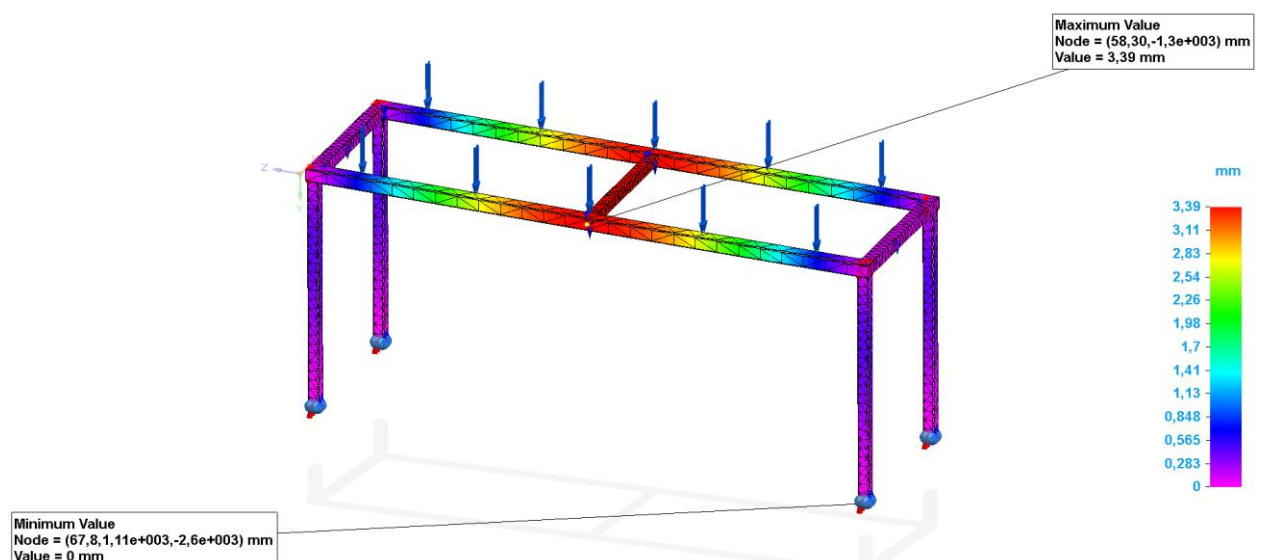
Inseneri kohustus on hoida detaili või konstruktsiooni pingete intensiivsuse (*Von Mises Stress*) maksimaalne väärtus alla selle materjali lubatud tugevuse väärtuse.

Joonisel 9 on näha mis piirkonnas kehtivad need pinged ning nende jaotust alusraamil. Erinevad piirkonnad on erinevat värvi. Mida punasem on piirkond, seda suuremad pinged ning mida sinisem seda väiksemad pinged seal on. Joonisel on näha, et antud juhul maksimaalseks pinge väärtuseks on 128 MPa, samuti on näha ka nõ kõige kriitilisema punkti asukoht. Meie terase margi tinglik voolavuspiir (*Yeld Stress*) võrdub 275 MPa, seega projekteeritava alusraami maksimaalse pinge väärtus ei ületa materjali lubatud tugevuse väärtust, vaid jääb sellest alla. Sellest saab teha järelduse, et antud konstruktsioon on ohutu.



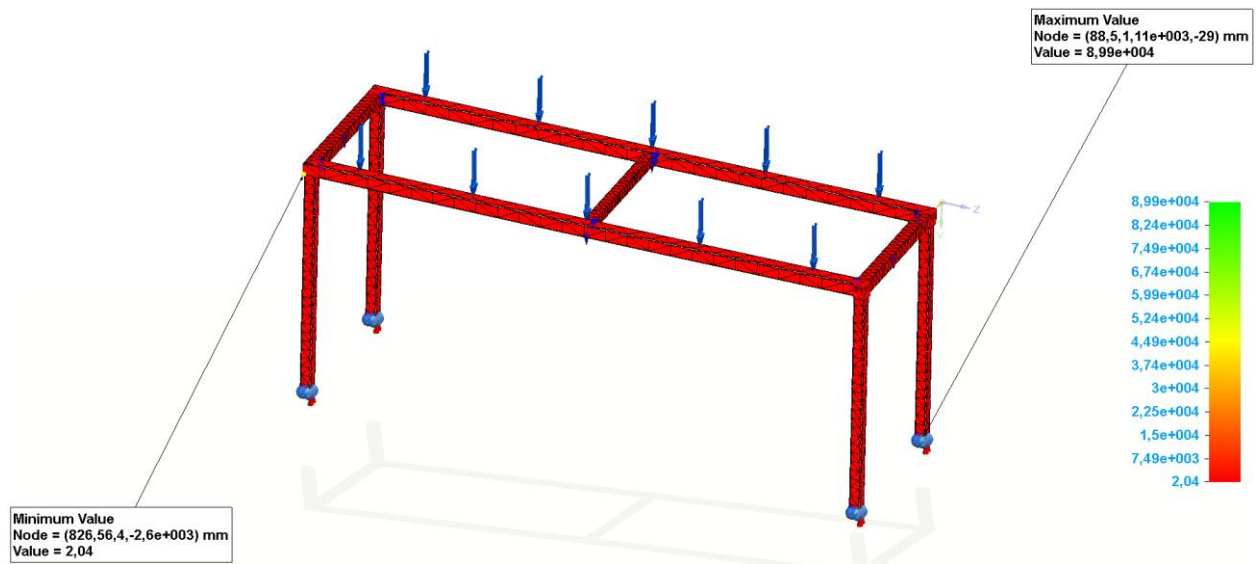
Joonis 9. Alusraami pinged.

Joonisel 10 on näha siirdeid (*Displacement*). Programm näitab, mis punktis on kõige suuremad ja väiksemad siirded ning nende väärtust ja koordinaate. Antud juhul maksimaalne siire on punktis alusraami ülemise osa keskel ja selle väärtus on 3,39 mm. Minimaalne siire asub alusraami jala alumises osas ja selle väärtus on 0 mm. Programm näitab erinevate värvidega siirete suurust. Mida sinisem on värv seda väiksem ja mida punasem värv seda suurem on siire. Tänu selle saab hinnata detaili kriitilisi kohti ning siirete väärtusi.



Joonis 10. Alusraami siirded.

Joonisel 11 on näha arvutuste järgmist etappi - tugevusvaru teguri arvutuse tulemust. Programm arvutab tugevusvaru teguri ja näitab selle miinimum- ja maksimumpunkti, asukohta ning väärtust. Projekteeritava alusraami nõrgemaks kohaks on ülemised nurgad kuid nende tugevusvaru tegur on 2,04, mis rahuldab projekteerimistingimusi. Ülejäänud kohad raamil on tunduvalt suurema tugevusvaruga.



Joonis 11. Alusraami tugevusvaru tegur.

Saadud andmete põhjal on võimalik hinnata projekteeritud toote kriitilisi kohti ning teha järeldusi.

6.7. Kokkuvõte

Antud lõputöö peatükis on projekteeritud S-1/V-1 ventilatsiooniagregaadile alusraam, mille abil ventilatsiooniruumis on võimalik kasutada lisaks olemasolevale ventilatsiooniseadmele ka uut projekteeritavat seadet.

Projekteeritud alusraamile on vormistatud joonised (lisa 6) ja samuti on läbi viidud tugevusarvutus lõplike elementide meetodil projekteerimistarkvara *Solid Edge Simulation* keskkonnas mis tõestab, et antud alusraam on piisavalt stabiilne ja tugev ning selle tugevusvaru tegur on minimaalselt kahekordne, mis rahuldab projekteerimise tingimusi - seega antud alusraami disaini muutma ei pea.

7. PROJEKTEERITAVA VENTILATSIOONI LÜHIKIRJELDUS

TOCI OÜ uue juurdeehitatava tootmishoone projekteeritav ventilatsioon baseerub mitmel süsteemil: sissepuhke-väljatõmbesüsteemil S-1/V-1 ventilatsiooniagregaadi ja kohtaratõmbe süsteemidel V-2...V-6 filterseadmete baasil.

Sissepuhke-väljatõmbesüsteem S-1/V-1 koosneb ventilatsiooniagregaadist, mille asukohaks on projekti järgi vahekorrusel asuv ventilatsiooniruum, kus juba asub ka praegune ventilatsiooniseade, mis teenindab olemasolevat tootmishoonet. Selleks, et oleks võimalik samasse ruumi paigaldada ka uus ventilatsiooniseade, on antud lõputöös projekteeritud alusraam, mis võimaldab paigutada ühe seadme teise seadme kohale, kõrgusele ca. 1,1m põrandast. Projekti põhiselt ventilatsiooniruumis olevad õhukanalid on soojusisoleeritud. Ventilatsioonitorud, mis läbivad tuletõkkeseptsiooni (tuletõkkeseptsiooniks on siin ventilatsiooni ruum), on varustatud tuletõkkeklappidega. Nii sissepuhke- kui ka väljatõmbekanalid on varustatud ventilatsiooniseadme müra vähendamise eesmärgil mürasummutitega. Sissepuhutava- ja väljatõmmatava õhu hulka reguleeritakse kas otse lõppelementide (plafoonid, restid jt) või reguleerklappide (RK) abil. Reguleerklapid on samuti mõeldud süsteemi tasakaalustamiseks.

Sissepuhe: Põhikorruse sissepuhkeventilatsiooni plaan on näidatud Lisas 3 „Põhikorruse ventilatsiooniplaan: sissepuhe“ ning Lisas 5 „Põhikorruse ventilatsiooniplaan: LÕIGE A-A“.

Värske õhuga ruumide varustamise eest vastutab S-1 sissepuhkesüsteem. Välisõhu võtu jaoks väljast on välisseinale projekteeritud putukavõrguga varustatud õhuvõturest. Värsket õhku transporditakse ruumidesse õhukanalite kaudu, mis asuvad tsehhis kõrgusel 3,3 m põrandast ja jooksevad mööda tsehhi seina mõlemas suunas. Õhu jaotamine toimub sissepuhkeplafoonide ja õhudifuusorite kaudu. Keevituskohtade värske õhuga varustamiseks on igale töökohale projekteeritud oma sissepuhkeplafoon. Ülejäänud ruumi värske õhuga varustamiseks on mõeldud õhudifuusorid viskepikkusega üle 5 meetri, mis on

paigaldatud ventilatsioonitorustikule mõlemal pool tsehhi. Meistri kabineti lae alla on samuti projekteeritud üks sissepuhkeplafoon, mis varustab kabineti värske õhuga.

Väljatõmme: Põhikorruse väljatõmbeventilatsiooni plaan on näidatud lisas 4 „Põhikorruse ventilatsiooniplaan: väljatõmme“ ning lisas 5 „Põhikorruse ventilatsiooniplaan: LÕIGE A-A“.

Väljatõmbesüsteemi V-1 eesmärgiks on õhu eemaldamine uue hoone ruumidest. Tsehhi ruumi heitõhu ja suitsu efektiivseks eemaldamiseks asuvad väljatõmberestid tsehhi osas, kus õhku eraldub kõige rohkem saasteaineid – keevituse poole peal. Õhukanal väljub ventilatsiooniruumist ja selle üks osa läheb kõrgusele 5,5 meetrit põrandast keevitusala keskele. Teine õhukanal jookseb kõrgusel 4,5 meetrit põrandast teises suunas – meistri kabineti ja WC ruumi poole. Õhu eemaldamiseks tsehhist on mõeldud väljatõmberestid, mis asuvad õhukanali küljes kõrgusel 5,5 m põrandast. Õhu eemaldamiseks meistri kabinetist ja WCst on projekteeritud lae all asuvad väljatõmbeplafoonid. WC ruumi sisse läheb õhk siirdeõhuna, kas ukse alla tehtava pilu kaudu või ukse alumisse serva monteeritud siirdeõhuresti kaudu. Süsteemi heitõhu väljavise toimub katusel oleva väljaviske difuuseri kaudu.

Käsikeevituse kohtäratõmbesüsteemid V-2...V5 on projekteeritud filterseadmete baasil, mille abil toimub keevituse saasteainetega saastunud õhu puhastamine ja retsirkulatsioon. Antud projektis on kasutatud mobiilseid, painduva imutoruga varustatud filterseadmeid, mis võimaldab neid vajadusel kasutada statsionaarsest töökohast eemal.

Keevitusrobotit teenindab kohtäratõmbeseade V-6 filterseadme baasil, mis teostab saastunud õhu puhastamist ja retsirkulatsiooni. Kevitussuitsu eemaldamiseks on roboti koha peale projekteeritud kubu 1,25x2,5x0,5m (LxPxK). Kubu ja V-6 süsteemi filterseade on ühendatud omavahel tsinkplekist õhukanaliga.

8. TULEMUSED JA ARUTELU

Antud lõputöös on uuritud energiatõhusa ventilatsioonisüsteemi projekteerimise eesmärgil kohtäratõmbe erilahendusi: õhu retsirkulatsiooni kasutatavat mobiilsete filterseadmete baasil ventilatsioonilahenduse kasutamise kasumlikust, energiasäästu ja tasuvust võrdluses väljatõmbeventilaatoritega varustatud soojust mittetagastava lahendusega.

Punktis 5 saadud arvutustulemuste põhjal on koostatud tabel 16, kus on näidatud esimese ja teise ventilatsioonilahenduse soojus- ning elektrienergia kulu aastas ja saadud väärtuste vahet.

Tabel 16. TOCI OÜ ventilatsiooni erilahenduste aastase energiakulu tabel

Energia liik	Lahendus 1, kW·h/aasta	Lahendus 2, kW·h/aasta	Vahe, kW·h/aasta	Lahendus 1, EUR/aasta	Lahendus 2, EUR/aasta	Vahe, EUR/aasta
Elektrienergia	7 632	9 765,6	-2133,6	915,84	1 171,87	-256,03
Soojusenergia	26 538	1 043	25 495	907,6	35,67	871,93
Kokku	34 170	10 808,6	23 361,4	1 823,44	1 207,54	615,9

Arvutused näitavad, et energiatõhusam ventilatsioonilahendus, vaatamata kõrgemale alginvesteeringule, aitab säästa aastas 615,9 EUR ning selle diskonteerimata tasuvusaeg võrdluses teise ventilatsioonilahendusega on ligikaudu 4 aastat ja 10 kuud.

Kui arvestada, et filterseadmete prognoositav eluiga on 10-20 aastat ning aastane kokkuhoid 615,9 EUR, siis korrutades saadud summa aastate arvuga saame, et viie aastaga on saavutatud energiasääst summas 3079,5 EUR, kümne aastaga 6159 EUR, viietestkümne aastaga 9238,5 EUR ja kahekümne aastaga 12318 EUR.

Kui vaadelda ainult filterseadmeid ja võtta arvesse nende maksumust, mis on võrdeline 5080 EUR (tabel 15) ning teades, et kümne aastaga saab nende kasutamisega säästa energiat 6159 EUR eest on näha, et nende diskonteerimata tasuvusaeg on alla kümne aasta, mis ületab nende eluiga. Peale selle aja, kui filterseadmete seisukord on endiselt rahuldav, saab neid kas jääkväärtusega maha müüa ning osta uued seadmed, või jätkata nende kasutamist tööea

lõpuni ja alles siis investeerida uutesse seadmetesse. Sellest kõigest saab teha järelduse, et investeerimine ventilatsiooniseadmetesse on igati mõislik, kui soov on luua tervislikku töökeskkonda säästes samal ajal nii soojust- kui ka elektrienergiat.

Projekteerimisel on valik tehtud energiatõhusama ventilatsioonilahenduse kasuks, kuna arvutused on tõestanud, et see on majanduslikult otstarbekas ja tänu väiksemale energiakasutusele säästab ressursse. Samuti peaks mainima ka asjaolu, et energiatõhusam lahendus filterseadmete baasil ei reosta loodust, sest saasteaineid püütakse kinni ega utiliseerita otse atmosfääri nagu teise võrreldava ventilatsioonilahenduse korral.

Projekteeritava ventilatsioonilahenduse summaarseks aastaseks energiakulu maksumuseks on saadud 1207,54 EUR.

TOCI OÜ soojusenergia tootmiseks kasutatakse maagaasi. Juhul kui kasutusel oleks teist liiki kütust, kaugküte või elekter erineksid tulemused saadud andmetest. Näiteks teades, et elektri- ja kaugkütte hinnad on kallimad võrreldes maagaasiga, tähendab see, et filterseadmete tasuvusaeg oleks lühem. Seega mida kallim on soojusenergia hind seda lühem on õhu rekuperatsiooni kasutatavate filterseadmete tasuvusaeg.

Lõputöö käigus saadud andmete ning tulemuste põhjal on koostatud ventilatsiooni projekt koos ehituskirjeldusega (lisa 7) ning teostatud ventilatsiooni projekteerimine (lisa 3, 4 ja 5).

9. KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli projekteerida energiatõhus ventilatsioon TOCI OÜ uuele tootmishoonele, millest suurema osa moodustab metallitöötlemise tsehh, kus hakkavad toimuma ka keevitusprotsessid. Antud eesmärgi saavutamiseks olid püstitatud järgmised ülesanded: uurida sisekliimaga seotud probleeme metallitööstuses ja analüüsida nende võimalikke lahendusi. Samuti sai koostatud ventilatsiooniprojekt ja ehituskirjeldus.

Uuringud on näidanud, et keevitus- ja lihvimisprotsesside ajal tekkivad saasteained ning küttenede kontsentratsioon ületab lubatud piirnormi, mõjutab see tugevalt inimorganismi, ohustades tervist. Antud probleemi lahenduseks on vaja kasutada efektiivset ventilatsiooni, mis võimaldab eemaldada saasteaineid otse neid tekitanud allika juures kohtäratõmbe ventilatsiooni abil.

Lisaks sai läbiviidud kahe ventilatsioonilahenduse arvutus ja võrdlus, mille tulemusena püstitati hüpotees, et õhu retsirkulatsiooni kasutatav kohtäratõmbelahendus filterseadmete baasil on vaatamata kõrgematele investeerimiskuludele, võrreldes lahendusega mis ei kasuta õhu retsirkulatsiooni, siiski energiasäästlikum ventilatsioonilahendus. Tuginedes arvutustele, leidis eelpoolnimetatud hüpotees kinnitust ning on selge, et valitud lahendus võimaldab säästa nii loodulikke kui ka materiaalseid ressursse. Tulemused näitavad, et kohtäratõmbe ventilatsioonilahendus filterseadmete baasil, võrreldes teise lahendusega, tasub ennast ära keskmiselt viie aastaga. Kui võtta arvesse asjaolu, et selle kohtäratõmbelahenduse seadmete summaarne maksumus on 5080 EUR ning antud lahendus võimaldab säästa aastas elektri- ja soojusenergiat summas 615,9 EUR on jõutud järelduseni, et antud lahenduse lihttasuvusaeg on alla 10 aasta, mis arvestades seadmete prognoositava elueaga (10-20 aastat) on hea tulemus.

Tuginedes uuringutele, arvutustulemustele ning analüüsidele võin kinnitada, et käesoleva magistritöö raames kavandatud ventilatsioonilahendus on TOCI OÜ jaoks efektiivne ning energiatõhus ja selle rakendamisel tagaks see ruumides viibimise ning inimtegevuse jaoks tervisliku sisekliima.

10. SUMMARY

The aim of the work was to design energy-efficient ventilation for the new production building of TOCI OÜ, who is one of the most successful Estonian metal-working enterprises providing metalwork and laser cutting services. To achieve this goal, I studied the problems of indoor climate in the metal industry, analysed their possible solutions and evaluated the impact of the welding processes pollutants on the human body. A ventilation project and a building description plan were also prepared.

Studies have shown that normally different contaminants occur during welding and grinding processes and if their concentration exceeds the maximum level, it can strongly affect the human health. To solve this problem, it is necessary to use effective ventilation, which allows the direct removal of contaminants from the source and this can be achieved by using the local exchange ventilation system.

In addition, the calculations and comparisons of the two ventilation solutions were carried out, which resulted the confirmation of abovementioned hypothesis that the local exchange ventilation that utilize air recirculation and is based on filtering equipment, despite higher investment costs, compared to a solution that does not use air recirculation, can in fact provide significant save in energy and resources.

The results show that the solution for ventilation that is based on filtering equipment is worth comparing with another solution on average for five years. Taking into account the fact that the total cost of this local exchange system equipment is 5080 EUR and this solution allows an annual saving of 615.9 euros in electricity and heat, the payback period of this solution is less than 10 years which, taking into account the estimated life expectancy of equipment (10-20 years), is a good result.

Taking into account the studies, calculations and analyses, this work can help in designing energy efficient ventilation for the new production building of TOCI OÜ, which saves energy and ensures a healthy indoor climate for human activities.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. An Office Building Occupants Guide to Indoor Air Quality. (1997). [veebileht] <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/office-building-occupants-guide-indoor-air-quality> (21.05.2018).
2. Hoonete tehnoeadmed üldiselt. (2007). Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast: Eesti standard EVS-EN 15251:2007. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-15251-2007> (21.05.2018).
3. **Awbi, H.B.** (2011). Energy efficient ventilation for retrofit buildings. Proceedings of 48th AiCARR International Conference on Energy Performance of Existing Buildings. pp. 23-46.
4. **Abel, E., Voll, H., & Tark, T.** (2014). Hoone energiatarve ja sisekliima (2nd ed.). Tallinn: EKVÜ : Presshouse. 308 lk.
5. **Hussain, A.K., Lateef, A., Javed, M., Pramesh, T.** (2010). Influence of Welding Speed on Tensile Strength of Welded Joint in TIG Welding Process. – JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING RESEARCH, DINDIGUL Volume 1, No 3.
6. **Laansoo, A.** (2011). Keevitustehnoloogia. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 172 lk.
7. Kutseohutus. Tööstushügieen. Keevitustööd ja keevitaja kutseoskus. (2018). Health and safety in welding and allied processes - Laboratory method for sampling fume and gases - Part 4: Fume data sheets (ISO 15011-4:2017): Eesti standard EVS-EN ISO 15011-4:2018. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-15011-4-2018> (21.05.2018).
8. Kutseohutus. Tööstushügieen. Keevitustööd ja keevitaja kutseoskus. (2009). Health and safety in welding and allied processes - Laboratory method for sampling fume and gases - Part 3: Determination of ozone emission rate during arc welding: Eesti standard EVS-EN ISO 15011-3:2009. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-15011-3-2009> (21.05.2018).
9. **Grubbs, R. & Miyashita, A. & Liu, M. & Burk, P.** (1978). Preparation and reactions of phosphine nickelocyclopentanes. – Journal of the American Chemical Society 100(8). 10.1021/ja00476a026.

10. Welding and Welding Fumes. (2017). Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. [veebileht]
<https://www.irsst.qc.ca/Portals/0/upload/misc/2017/forum-cancerogene/en/Welding-Fumes.pdf> (21.05.2018).
11. Occupational Safety and Health Standards. (2018). 29 CFR 1910 OSHA General Industry Regulations Part 251-256. United States Department of Labor. [veebileht]
https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9852 (21.05.2018).
12. **Gheorghe, A. & Nitoi, D. & Petrescu, V. & Apostolescu, Z. & Chivu, O.R.** (2017). Contributions to risk assessment in the departments of welding mechanical engineering companies. MATEC Web of Conferences. 121. 11001. 10.1051/mateconf/201712111001.
13. Health and safety in welding and allied processes - assessing and controlling the exposure risk and complying with the COSHH regulations for welding fume. (2018). [veebileht]
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-health-and-safety-in-welding-and-allied-processes-assessing-and-controlling-the-exposure-risk-and-complying-with-the-coshh-r/> (22.05.2018).
14. **Zare S, Sahranavard Y, Ali Hakimi H, Bateni M, Karami M, Hemmatjo R.** (2017). Designing, Constructing and Installing a Local Exhaust Ventilation System to Minimize Welders' Exposure to Welding Fumes. Arch Hyg Sci. 2017; 6 (4) :356-362
15. **Wallace, M.** (1997). In-Depth Survey Report: Control Technology Assessment for the Welding Operations. Report No. ECTB 214-13a. Washington, DC: U.S. Dept. of Labor, OSHA.
16. Welding processes Code of Practice 2013. (2013). Office of Industrial Relations Workplace Health and Safety Queensland [veebileht]
https://www.worksafe.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0019/58204/welding-processes-cop-2013.pdf (22.05.2018).
17. Welding and Structural Metals. (2012). [CAN/CSA-W117.2-12. (R2017) - Safety in welding, cutting, and allied processes. Canadian Standard. 160 p. [veebileht]
<http://shop.csa.ca/en/canada/welding-and-structural-metals/canrsa-w1172-12/invnt/27013222012>. (22.05.2018).
18. Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes. (2017). ANSI Z49.1:2012 An American National Standard [veebileht]
https://pubs.aws.org/content/free_downloads/AWS_Z49.1_SAFETY_IN_WELDING_AND_CUTTING_AND_ALLIED_PROCESSES.pdf (22.05.2018).

19. **Shibata, N., Tanaka, M., Ojima, J., Iwasaki, T.** (2000). Numerical simulations to determine the most appropriate welding and ventilation conditions in small enclosed workspace. – *Industrial Health*. Vol. 38(4). pp. 356-365.
20. Japan Welding Engineering Society. (1993). Welding Research No.33 JWES-WM-9401. Chapter 4, pp. 145–170. Tokyo (in Japanese).
21. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice, 28th Edition. (2013). Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 626 p.
22. **Walker, A.** (2010). Natural Ventilation. – WBDG Whole Building Design Guide. 2010. Vol. 15.
23. **Kleiven, T.** 2003. Natural Ventilation in Buildings: architectural concepts, consequences and possibilities. Doktoritöö. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. 305 lk.
24. **Haojie, W., Qingyan, C.** (2012). A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*. 54. 386–394. 10.1016/j.enbuild.2012.07.028.
25. HSG 202 General Ventilation in the Workplace. Guidance for employers. (2000). /Notwich: Health and Safety Executive. 16 p.
26. Duffin, L. 2013. Validation of Training Concepts for Effective Ventilation Control for Welding Fumes in Confined Spaces. Magistratöö. University of Washington. Washington. 36 lk.
27. Welding equipment. (2008). Health and safety in welding and allied processes -- Requirements, testing and marking of equipment for air filtration -- Part 2: Determination of the minimum air volume flow rate of captor hoods and nozzles: Eesti standard ISO 15012-2:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/products/iso-15012-2-2008> (22.05.2018).
28. **Delson, J.** (2016). Robotic welding fume capture 101. Staying on top of air quality in heavy robotic welding environments. – *PRACTICAL WELDING TODAY*. July/August 2016.
29. What does MERV or MERV Rating mean? [veebileht] <https://www.filters4life.com/What-is-MERV-rating-s/4961.htm> (22.05.2018).
30. Guidelines. Recommended Practices for Filtration for Welding Fumes. (2009). The National Air Filtration Association (NAFA). [veebileht] <https://www.nafahq.org/wp-content/uploads/Welding-Fumes-Secured.pdf> (22.05.2018).
31. **Hosansky, D.** (2016). Electrostatic precipitator. – *Encyclopædia Britannica* [veebileht] <https://www.britannica.com/technology/electrostatic-precipitator> (22.05.2018).
32. Air purifiers, Dust Collectors, Fume Extractors and Industrial Air Cleaners. [veebileht] <http://www.quatro-air.com/> (22.05.2018).

33. Keevitusseadmed. (2018). Health and safety in welding and allied processes - Equipment for capture and separation of welding fume - Part 1: Requirements for testing and marking of separation efficiency (ISO 15012-1:2013): Eesti standard EVS-EN ISO 15012-1:2013. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-15012-1-2013> (22.05.2018).
34. **Angelstok, F.** (2006). Ventilatsiooni alused. Tallinn: Sisekaitseakadeemia. 64 lk.
35. Ventilatsiooni- ja kliimasüsteemid. (2018). Mitteiluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017: Eesti standard EVS 906:2018. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-906-2018> (22.05.2018).
36. Extraction arms: KUA. [veebileht] <https://www.plymovent.com/en/welding-cutting-fume-removal/products/kua> (22.05.2018).
37. Welding Smoke Extraction VarioHood - Modular Extraction Hood. [veebileht] https://www.kemper.eu/en/products/welding-smoke-extraction-variohood---modular-extraction-hood_p6929 (22.05.2018).
38. Product Selection Tools: ACON for Air Treatment. [veebileht] <https://www.flaktgroup.com/en/support/selection-tools/> (22.05.2018).
39. Fans: FUA. [veebileht] <https://www.plymovent.com/en/oil-mist-removal/products/welding-cutting-fume-removal/fans/fua> (22.05.2018).
40. Fans: FAN-28. [veebileht] <https://www.plymovent.com/en/oil-mist-removal/products/oil-mist-removal/fans/fan-28> (22.05.2018).
41. 2018. AASTA KALENDAARSE TÖÖAJAFONDI ARVESTUS. [veebileht] <https://fmjraamatupidajad.ee/uudised/2018-aasta-kalendaarse-tooajafondi-arvestus/> (22.05.2018).
42. Mobile filters: MobilePro. [veebileht] <https://www.plymovent.com/en/welding-cutting-fume-removal/products/mobilepro> (22.05.2018).
43. AirFill with extraction arm, 3m. [veebileht] https://www.teka-warehouse.de/index.php?seo_path=airfill-mit-absaugarm (22.05.2018).
44. Plymovent Energy Saver ES-90/005. User Manual. [veebileht] http://www.rapidwelding.com/files/MAN_ES-90.pdf (22.05.2018).
45. Pro Tools & Equipment, Inc. [veebileht] www.protools.ws (22.05.2018).
46. Mehaanikainseneri käsiraamat. (2012). /Toim. P. Kulu, E. Hendre. Tallinn: TTÜ kirjastus. 492 lk.
47. Health and Safety in Welding. (2006). Wellington: Department of Labour. [on-line] <https://worksafe.govt.nz/dmsdocument/206-health-and-safety-in-welding> (22.05.2018).
48. STOKKER AS. (2018). [veebileht] <https://www.stokker.ee/> (22.05.2018).

49. Soojusisolatsioon. Ventilatsiooni- ja kliimasüsteemid. (2017). Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 3: Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimise süsteemidele (Moodulid M5-1, M5-4). Eesti standard: EVS-EN 16798-3:2017. Tallinn: Eesti Standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-16798-3-2017> (22.05.2018).
50. Lindab Catalogue - Air Duct Systems. (2010). [veebileht] <https://itsolution.lindab.com/LindabWebProductsDoc/PDF/Documentation/ADS/Lindab/Technical/OX-Ventilation2010-ads.pdf> (22.05.2018).
51. Arve perioodil 01.01.2018-31.01.2018. (2018). Eesti Energia arve TOCI OÜ-le.
52. Arve perioodil 01.01.2018-31.01.2018. (2018). AS Eesti Gaasi arve TOCI OÜ-le.

LISAD